

ПОДБОР МАТЕРИАЛА ДЛЯ ТРУБОПРОВОДА ТРАНСПОР- ТИРОВКИ МОРСКОЙ ВОДЫ

Михалев Н. А., Калмыков Е.
Аврино Ю. М., Курбатов А. Ю.
Жуков А. П. Российский национальный
технологический университет
им. Д. И. Менделеева,
Москва, Россия

**В СТАТЬЕ ОПИСАНЫ ЭТАПЫ ПОДБОРА КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТРУБОПРОВОДА. РАССМОТРЕНА ВЗАИМОСВЯЗЬ МЕЖДУ
ЕГО СВОЙСТВАМИ И ПРОВЕДЕНЫ МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ПО ИЗУЧЕНИЮ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ, ИХ МЕХАНИЧЕСКИХ,
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК. ТАКЖЕ АВТОРОМ ИЗУЧЕН РЫНОК
ИСПОЛЬЗУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ, НА ОСНОВАНИИ ЧЕГО ВЫЯВЛЕНА ЭКОНОМИ-
ЧЕСКАЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ. КРОМЕ ТОГО,
ОПРЕДЕЛЕНЫ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ
ПРИГОДНОСТИ ДЛЯ ТРУБОПРОВОДА МОРСКОЙ ВОДЫ.**

Введение

Задача подбора материала – важнейший этап при проектировании трубопроводов. Рационально подобранный материал обеспечивает надёжную, долговечную и безопасную работу всей трубопроводной системы. Коррозионная стойкость выбранного материала и организация возможных методов защиты от

коррозии представляет собой основную трудность в проектировании. Это связано с широким рядом условий эксплуатации трубопроводов и чрезвычайным разнообразием транспортируемых сред. Существуют факторы, влияющие на скорость коррозии материала. К ним относят: эксплуатационные факторы (связанные с технологическим режимом производства), конструктивные факторы

(связанные с оформлением конструкции) и факторы, характеризующие состояние материала [1, 2].

Решение любой технической (технологической) задачи начинается с оценки технических (технологических) условий эксплуатации. В нашем случае, с оценки химической (коррозионной) агрессивности морской воды (состав pH, температура, давление, скорость движения и др.).

Морская вода, как электролит, имеет сложный солевой состав, с преобладающим содержанием хлоридов и сульфатов натрия, магния, кальция и калия. Также в ней присутствуют растворённые газы (например, кислород, диоксид углерода, сероводород) и большое количество микроорганизмов. В связи с этим, химический состав морской воды определяет основные особенности процесса коррозии как металлов, так и неметаллических материалов.

Практика широкого использования морской воды выделила как самостоятельный особый вид разрушения – морскую коррозию. Ей подвержены, в частности, трубопроводы морской воды, установки опреснения, аппаратура, охлаждаемая морской водой и т.д. Химический состав воды морей побережья Российской Федерации приведён в таблицах 1 и 2 [3].

ТАБЛИЦА №1

СОЛЁНОСТЬ ВОДЫ МОРЕЙ ПОБЕРЕЖЬЯ РФ

Море	Солёность, ‰*	Средняя температура, °C	
		1	2
Каспийское	3-13	0...+10	+24...+28
Чёрное	13-18	-0,5...+7	+25...+26
Балтийское	3-20	-0	+25...+26
Белое	21-34	-0,5...+1,7	+5...+7
Баренцево	30-35	-1...+5	+5...+10
Карское	3-34	-1,5...+1,7	0...+6
Лаптевых	1-32	-0,8...+1,7	+0,8...+10
Чукотское	24-34	-1,6...+1,8	-2...+4
Берингово	28-33	-1,5...+3	+4...+11
Охотское	7-34	-1,5...+1,8	+2...+15
Японское	27-34	0...+4	+19...+27

* ‰ – промилле, количество твёрдых веществ в граммах, растворённое в 1000 г морской воды.

ТАБЛИЦА № 2

**ОСНОВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ
СОЛЕВОГО СОСТАВА
МОРСКОЙ ВОДЫ**

Соль	Содержание, %
NaCl	77,8
MgCl ₂	10,9
MgSO ₄	4,7
CaSO ₄	3,6
K ₂ SO ₄	2,5
CaCO ₃	0,3
MgBr ₂	0,2

На поверхности в открытых районах океанов солёность воды примерно одинакова и составляет 33–36‰. Но вода внутренних морей, имеющих ограниченную связь с Мировым океаном, может существенно различаться. В зависимости от района, солёность таких водоёмов может варьироваться от 3–5 до 25‰. Морская вода обладает нейтральной или слабощелочной реакцией (pH 7,2–8,6) и служит хорошим электролитом (удельная электропроводность $2,5\text{--}3,0 \cdot 10^6 \Omega^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$). Содержание кислорода может достигать 8 мг/л, значительно уменьшаясь до глубины 1000 м (около 1 мг/л) и затем снова возрастая. Воды Чёрного моря содержат сероводород.

В связи с интенсивным развитием инфраструктуры Северного морского пути – интересны данные о составе вод морей Северного Ледовитого океана. Особенности протекания морской коррозии заключаются в:

- 1) высокой химической агрессивности морской воды (см. таблицу 1),
- 2) наличие ионов-активаторов, препятствующих возникновению пассивного состояния (Cl^- , Br^- , I^- , SO_4^{2-} и др.);
- 3) возможность для проявления питтинговой коррозии. С другой стороны, наличие в морской воде даже незначительных количеств кремниевой (H_2SiO_3) или угольной (H_2CO_3) кислот способствует образованию на поверхности металла различных инкрустаций, которые в итоге образуют на поверхности металла труднорастворимые пленки, что влияет на скорость коррозии;

ТАБЛИЦА № 3

ШКАЛА КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Группа стойкости металлов	Скорость коррозии металла, мм/год	Балл
Совершенно стойкие	<0,001	1
Весьма стойкие	0,001–0,005 0,005–0,01	2 3
Стойкие	0,01–0,05 0,05–0,1	4 5
Пониженно-стойкие	0,1–0,5 0,5–1,0	6 7
Малостойкие	1,0–5,0 5,0–10,0	8 9
Нестойкие	10	10

2) значительном влиянии скорости движения воды на коррозионное поведение металлов. При оценке влияния скорости движения следует учитывать возможное дополнительное влияние растворимого в воде кислорода (воздуха);

3) возможности возникновения контактной коррозии в силу низкого омического сопротивления электрохимического процесса (коррозии);

4) заметном влиянии биологических и биохимических факторов, определяемых обрастванием материала конструкции морскими животными микроорганизмами и/или растительными макро- и микроорганизмами. Активному обрастванию подвержены алюминий и его сплавы, все виды сталей и сплавы на никелевой основе, олово, свинец. На другом полюсе – медь и большинство медных сплавов, что связано с токсичностью соединений меди для биосистем, а также титан и его сплавы.

В итоге, мы имеем основную базу данных для решения задачи подбора конструкционного(ых) материала(ов) для определённой технологической системы: среда и условия работы и определённый банк материалов. Требуется подобрать материал для надёжной работы технологической системы (в нашем случае, трубопровода для транспортировки морской воды).

Надёжность – комплексное свойство, которое в зависимости от назначения объекта и условий его применения может включать в себя безотказность, восстанавливаемость, ремонтопригодность, сохраняемость или определён-

ное сочетание этих свойств. Здесь зачастую важно определить приоритеты.

Маршрут (алгоритм) подбора материала традиционный:

- оценка уровня коррозионной стойкости;
- оценка уровня механических свойств;
- оценка технологических свойств;
- оценка экономической ситуации на рынке конструкционных материалов.

На рисунке 1 представлена схема подбора конструкционного материала [4, 5].

Оценка коррозионной стойкости материалов

На первом этапе проведена оценка коррозионной стойкости материалов. Согласно десятибалльной шкале коррозионной стойкости металлов (ГОСТ 13819–68), она характеризуется глубинным показателем коррозии P , мм/год:

$$P = 8,766 \frac{K_{\text{макс}}}{\rho} [\text{мм}/\text{год}] \quad (1)$$

На основании этой величины с помощью десятибалльной шкалы коррозионной стойкости материалов судят о стойкости материала в данной среде (таблица 3).

На практике в качестве материалов, эксплуатируемых в морской воде, используются различные стали, медь и её сплавы, алюминиевые сплавы и полимерные трубы. Ниже представлены данные о стойкости таких материалов в морской воде (таблица 4) [6, 7].

В морской воде коррозионной устойчивостью обладают медно-никелевые сплавы МНЖМц11-1, 1-0,6 и МНЖ5-1, алюминиевый сплав АМг2, латуни ЛА77-2 и ЛОМш70-1-0,05, стали 03Х17Н14М2,

РИСУНОК 1.

АЛГОРИТМ ПОДБОРА КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА



12Х18Н9Т, 17Г1С-У, Ст10, 08Х13, пластик ПЭ100 и бронза БрАЖМц10-3-1.5. Следует отметить, что существуют некоторые особенности коррозионного поведения материалов при их эксплуатации в морской воде:

- Сталь марки 08Х13 в морской воде подвержена точечной коррозии и коррозионному растрескиванию.
- Сталь марки 17Г1С-У также склонна к язвенным поражениям.
- Нержавеющая сталь 12Х18Н9Т склонна к язвенной коррозии, интенсивность которой может достигать значительных размеров, из-за чего необходимы дополнительные затраты на электрохимическую защиту. Нержавеющая сталь 03Х17Н14М2, дополнительно легированная молибденом, устойчива к питтинговой и щелевой коррозии, имеет хорошее сопротивление в загрязненной и морской атмосфере, но малоустойчива к коррозионному растрескиванию.
- Медь МЗ неустойчива в быстро движущихся водных системах из-за кавитационной коррозии, особенно, если вода аэрирована, в зонах образования завихрений (крутые изгибы, стыки, места установки вентилей, задвижек, штуцеров, отводов) наблюдается коррозионное поражение меди очагового характера. В связи с этим рекомендуется не допускать скорость воды в медных трубах выше 1,34–1,5 м/с и удалять из воды воздух и взвешенные твердые частицы.
- При малых скоростях движения морской воды коррозионная стойкость стали ниже, чем меди. При скорости движения воды, не превышающей 2–2,5 м/с, коррозия стальных труб относительно невелика со сплошным характером поражения.
- Латуни подвержены присущему им обесцинкованию (до 1,6 мм/год), скорость которого зависит от содержания в воде хлоридов. Алюминиевая латунь ЛА77-2 более устойчива в быстро движущихся водах (кавитационная коррозия). В загрязненных водах медно-никелевые сплавы предпочтительнее алюминиевой латуни, так как последняя подвержена питтинговой коррозии. Оловянные латуни ЛОМш70-2-0,05, называемые морскими латунями, благодаря своей высокой стойкости в морской воде, склонны к самопроизвольному коррозионному растрескиванию.

ТАБЛИЦА №4

КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ МАТЕРИАЛОВ В МОРСКОЙ ВОДЕ

Материал	Скорость коррозии, мм/год	Балл стойкости	
Ст3	0,5935	7	пониженно-стойкие
Ст45	0,3694	6	пониженно-стойкие
Ст60	0,3006	6	пониженно-стойкие
40Х	0,4033	6	пониженно-стойкие
20Х13	11,4	10	нестойкие
Ст10	0,0715	5	стойкие
08Х13	0,0381	4	стойкие
17Г1С-У	0,098	5	стойкие
09Г2С	2,0961	8	малостойкие
12Х18Н9Т	0,0225	4	стойкие
AISI 316 L (03Х17Н14М2)	0,0076	2	весьма стойкие
М3	0,05	5	стойкие
МНЖМц11-1,1-0,6	0,03	4	стойкие
МНЖ5-1	0,02	4	стойкие
ЛА77-2	до 0,008	3	весьма стойкие
ЛОМш70-2-0,05	до 0,007	3	весьма стойкие
БрАЖМц10-3-1,5	0,0097	3	весьма стойкие
AMг2	до 0,007	3	весьма стойкие
ПЭ100	не растворяется	1	совершенно стойкие

Для предотвращения растрескивания латунные полуфабрикаты и изделия подвергают низкотемпературному отжигу.

7. При скоростях потока более 3,35 м/с рекомендуется применять мельхиор (МНЖМц11-1,1-0,6).

8. Сплав МНЖ5-1 не склонен к коррозионному растрескиванию.

9. Сплав БрАЖМц10-3-1,5 стоек к эрозии и кавитации.

10. Алюминиевый сплав АМг2 обладает скоростью коррозии в морской воде в 7–12 раз ниже, чем у стали и в 2–3 раза выше, чем у латуни ЛА77-2. Питтинг этого сплава достигает глубины 0,07 мм с диаметром 0,2–0,3 мм. Сплав не проявляет чувствительности к коррозионному растрескиванию и расслаивающей коррозии.

11. Важным ограничением становится применение сталей, оцинкованных горячим способом, с содержанием углерода не более 0,18% и содержанием кремния не более 0,37% (например, стали Ст3 и Ст10). Значение скорости коррозии цинковых покрытий при скоростях морской воды 1,5 и 3 м/с составляет 15–18 мкм/год. Толщина цинкового покрытия варьируется от 40 до 200 мкм.

Материалы, подверженные точечной коррозии (08Х13, 17Г1С, 12Х18Н9Т, ЛА77-2 и АМг2) нецелесообразно использовать при прокладке трубопроводов. И учитывая вышесказанное, материалы, соответствующие требованиям коррозионной стойкости в морской воде, следующие: оцинкованная сталь Ст3, сталь Ст10, нержавеющая сталь 03Х17Н14М2, медь М3, медно-никелевые сплавы МНЖМц11-1,1-0,6 и МНЖ5-1, латунь ЛОМш70-2-0,05, бронза БрАЖМц10-2-1,5 и пластик ПЭ100.

Оценка механических свойств материалов

При выборе надежного материала по механическим характеристикам руководствуются следующей информацией:

- Прочность в условиях действующих нагрузок и температур.
- Пластичность, определяющая возможность работы материала при переменных и ударных нагрузках;

ТАБЛИЦА №5

РАЗРУШАЮЩЕЕ ДАВЛЕНИЕ МАТЕРИАЛА ТРУБЫ

Материал		Предел прочности, σ _в , Мпа	Диаметр, мм	Стенка, мм	Р _{мак} , МПа	
Ст10	горячекатан.	340	25	2	54,4	
	холоднокатан.	360			57,6	
	Сталь оцинкованная	370–480			59,2	
	AISI 316L (03Х17Н14М2)	520			83,2	
	М3	180–190			28,8	
	МНЖМц11-1,1-0,6	270			56	
	МНЖ5-1	260			41,6	
		230			36,8	
	ЛОМш70-2-0,05	310–375			49,6	
		670–690			107,2	
БрАЖМц10-3-1,5		540–590			86,4	
ПЭ100		23			12,5	

- Склонность к изменению свойств в процессе эксплуатации для определения долговечности оборудования;
- Стабильность структуры при термическом и механическом воздействии;
- Стойкость к действию тепловых ударов и резких перепадов температур, присущих технологическому процессу.

В качестве механических характеристик обычно учитывается: временный сопротивление прочности при разрыве (σ_t), физический предел текучести (σ_{f}), условный предел текучести ($\sigma_{0,2}$), относительное удлинение при разрыве (δ), ударную вязкость (KCU) и твердость (HV и HV).

Ниже проведена оценка механических свойств материалов, выбранных на первом этапе. Для оценки прочностных качеств материала пользуются формулой Барлоу (2), по которой определяется давление, вызывающее разрушение пораженной коррозией трубы. В качестве исходных данных принимаются: внутреннее давление в трубе 0,4 МПа, создаваемое морской водой; пределы прочности для каждого материала [8].

$$P = \frac{2 \cdot \sigma_s \cdot b}{D} \quad (2)$$

Ниже представлены расчётные данные для труб размером 25×2 мм (внешний диаметр трубы $D_o = 25$ мм, толщина стенки трубы $b = 2$ мм) (таблица 5).

Исходя из расчётов, все материалы, выбранные в первом этапе, могут быть рекомендованы по механическим свойствам для транспортировки морской воды.

Оценка технологических характеристик материалов

Проведена оценка технологических свойств выбранных материалов, таких как свариваемость, обработка давлением, склонность к обработке резанием, пайка, варианты и особенности технологии обработки.

- Ст10: свариваемость без ограничений, кроме деталей после химико-термической обработки. Возможность обработки резанием. Не склонна в отпускной хрупкости. Пригодна для штамповки, поковки;
- Ст3 (оцинкованная): сварка может производиться без ограничений. Штамповка проводится в горячем и холодном состоянии, без последующей термической обработки. Сталь позволяет использовать автоматические дуговые и ручные способы сварки, контактно-точечный, лазерный виды сварки. В месте шва возможно испарение цинка (температура плавления цинка ниже температуры сварки) газообразный цинк ядовит, поэтому требуется высокопроизводительная вентиляция. Цинковое покрытие разрушается в месте шва, могут появиться поры и межкристал-

ТАБЛИЦА №6

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МАТЕРИАЛОВ ТРУБ

Материал трубы	Расчётный диаметр, мм	Размер, мм	Плотность, кг/м ³	Вес 1 м трубы, кг	Цена, руб/кг	Цена за 1 м, руб
Труба бесшовная холоднокатаная сталь 10 (ГОСТ 8734)	24,88	28×2	7850	1,28	48	61,44
Труба Ст3 оцинкованная (ГОСТ 3262-75)	20,31	25×2,5	7850	1,39	38,8	53,93
Труба нержавеющая aisi 316L (ГОСТ 9940-81, ГОСТ 9941-81)	22,25	25×1,5	7900	0,87	510	428,4
Труба медная М3 тянутая, матовая (ГОСТ 617-90)	28,7	32×2	8940	1,69	364	615,16
Труба медно-никелевая МНЖ5-1 прессованная, матовая (ГОСТ 617-90)	22,25	25×1,5	8700	0,96	590	566,4
Труба медно-никелевая МНЖМц11-1,1-0,6 прессованная матовая (ГОСТ 617-90)	19,22	22×1,5	8900	0,86	590	495,6
Труба латунная ЛОМш70-2-0,05 (ГОСТ 21646-76, ГОСТ 617-2006)	22,25	25×1,5	8600	0,95	337	320,15
Труба бронзовая БрАЖМц10-3-1,5 прессованная (ГОСТ 18175-78)	22,25	25×1,5	7500	0,83	358	297,14
Трубы полипропиленовые ПНД ПЭ-100 SDR 13,6 (ГОСТ 18599-2001(2003))	22,25	25×2	970	0,14	160	22,4

лизационные трещины. Поэтому околоводовую зону очищают от цинкового слоя или при сварке используют флюсы (электроды с флюсовым покрытием) для получения качественного сварного соединения;

- 3) AISI 316L: легко сваривается. Не требуется последующая термическая обработка. Сварные швы должны быть механически или химически очищены от окалины, затем пассивированы. Легко поддается формовке, волочению, гибке;
- 4) М3: высокая тепло- и электропроводность меди затрудняют её электросварку (точечную и роликовую), поэтому требуются более концентрированные источники нагрева и повышенные режимы сварки. Для сварки меди применимы практически все способы электро-дуговой сварки плавлением. Легкая окисляемость меди при высоких температурах приводит к засорению металла шва тугоплавкими окислами, которые снижают пластичность меди, что может привести к образованию горячих трещин. Для их удаления применяют флюсы на основе буры ($95\% \text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ и $5\% \text{Mg}$), которые способствуют

химической очистке, переводя тугоплавкие окислы в легкоплавкие комплексные соединения. Наиболее часто используют способ пайки медных труб твердыми и мягкими припоями. Трубы легко поддаются гибке;

- 5) МНЖМц11-1,1-0,6: обрабатывается методом горячей и холодной деформации. Трубы легко поддаются резке, сварке, пайке, полировка.

- 6) МНЖ5-1: горячая и холодная обработка давлением. Высокая скорость обработки резанием. Хорошо поддается пайке;

- 7) ЛОМш70-1-0,05: легко поддаются обработке давлением в холодном и горячем состоянии. Латунь удобна для паяния, нарезки, деформации и др. Все латуни хорошо паяются твердыми и мягкими припоями. При сварке латуней возможно испарение цинка (температура кипения 907°C , т.е. ниже температуры плавления меди). Образующийся окисел цинка ядовит, поэтому при сварке требуется хорошая вентиляция. Испарение цинка может привести к пористости металла шва. Это осложнение удается преодолеть предварительным подогревом металла до температуры

$200\text{--}300^\circ\text{C}$ и повышением скорости сварки, уменьшающим растекание жидкого металла и испарение цинка;

- 8) БрАЖМц10-3-1,5: плохо деформируется в холодном состоянии, но превосходно деформируется в горячем состоянии. При сварке алюминиевых бронз легко образуется тугоплавкий окисел засоряющий сварочную ванну, ухудшающий сплавление металла и свойства сварного соединения. Для его разрушения применяют флюсы, состоящие из фторидов и хлоридов, щелочных и других металлов;

- 9) ПЭ100: легко сваривается. Легко поддаются механической обработке (резанию, сверлению, фрезерованию и т.д.). Сварные швы по прочности превосходят прочность самих труб. Подвергается двум видам сварки: сварка встык и сварка с помощью элементов с закладными электронагревателями (электромуфтовая сварка). Склейивание труб исключается, так как материал обладает низкой адгезионной способностью в отношении химических веществ, не обеспечивая прочного соединения.

Технико-экономический анализ материалов

При технико-экономической оценке материалов труб руководствуются особенностями их эксплуатации, так как цена материала (руб/кг) не полностью отражает затраты на трубопровод:

- Толщина стенок меди и медных сплавов, регламентированная Регистром, в 1,5-2 раза меньше, чем стальных, что сближает реальную стоимость погонного метра стальных и труб из медных сплавов;
- Допустимые скорости потока жидкости в трубопроводах для разных материалов, как сказано выше, отличаются: для меди – 1,34-1,5 м/с; мельхиор – 3,35 м/с; стали – 2 м/с; оцинкованная сталь – 3 м/с; остальные материалы – 2,5 м/с. Это отражается в применении труб из разных материалов с различными диаметрами;
- Плотности материалов отличаются, в результате чего масса труб будет различным;
- Разные материалы обладают различным сроком службы в данных условиях.

Для технико-экономической оценки проводились расчёты необходимых диаметров труб для морской воды, подаваемой с помощью насоса, производительностью 3,5 м³/ч при давлении 0,4 МПа [8]:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot \omega}} \quad (3)$$

Масса труб определяется по формуле (4)[9]:

$$M = \frac{\pi}{4 \cdot 10^6} (D^2 - (D - 2 \cdot \delta)^2) \cdot \rho \cdot L \quad (4)$$

В таблице 6 представлены результаты расчётов и сортамент труб.

Из полученных данных видно, что:

- наименьшей стоимостью обладают трубы ПЭ100, оцинкованные и Ст10;
- самыми дорогими стали: трубы из нержавеющей стали (504,9 руб/м), меди (531,44 руб/м), медно-никелевого сплава (495,6 руб/м) и мельхиора (433,06 руб/м).

Рассматривая материал труб в перспективе на долгий срок эксплуатации, лучшим показателем «цена – долговечность» обладают трубы из полипропилен ПЭ100, латуни ЛОМШ70-2-0,05, бронзы

БрАЖМц10-3-1,5, стали Ст10 и нержавеющей стали AISI 316L.

Оценка вспомогательных свойств даёт возможность подобрать материал для конкретного применения в зависимости от назначения трубопровода, предлагаемого его срока службы и внешних условий воздействия.

Заключение

- Медь и медные сплавы бактерицидные материалы, не склонные к застанию стенок трубы микроорганизмами и продуктами коррозии, в отличие от стальных труб, что предотвращает увеличение шероховатости поверхности, падение давления в трубе и уменьшение пропускной способности трубы;
- Преимущество медных труб перед полипропиленовыми заключается в меньшем коэффициенте шероховатости; медные сплавы непроницаемы для вредных веществ и кислорода, в отличие от полимеров; также главный недостаток полипропиленовых труб – низкая огневая стойкость;
- Трубы из медных сплавов стойки к резким перепадам температур (от -230 °C до +350 °C): они не трескаются и не деформируются, в то время как стальные трубы при транспортировке холодной воды отпотеваются, и происходит коррозия и разрушение внешней стенки трубы; полипропиленовые трубы при температуре выше +40 °C теряют предел прочности на разрыв и становятся жёсткими, а при очень низких температурах (до -20 °C) трубы становятся хрупкими;
- Стальные трубы обладают ограниченной длиной поставляемых отрезков и ограниченной гибкостью, поэтому требуется большое число фасонных и соединительных деталей; трубы из медных сплавов более пластичные и просты в монтаже; полипропиленовые трубы еще более гибкие и пластичные, что упрощает их монтаж, даёт возможность многократного монтажа и демонтажа при низких затратах, но требуют большее число фиксирующих опор; они обладают высокой растяжимостью, обязывающей учитывать при прокладке трубопровода возможные линейные удлинения материала при расчёте длины и оборудования мест сопряжения;
- Полипропиленовые трубы обладают высокой звукоизоляционной способностью, что особенно важно, при

больших скоростях потока жидкости; трубы из сталей, меди и медных сплавов обладают низкой звукоизоляцией;

- Бронза обладает лучшими показателями прочности, в отличие от латуни. Она лучше противостоит коррозии и обладает лучшей антифрикционностью. Так же медь является мягким материалом, вследствие чего в условиях загрязнённой морской воды она уступает по износостойчивости бронзе, а эрозия стальных труб в этих условиях приводит к разрушению стенки труб и появлению в потоке мелких частиц металла, ускоряющих процесс коррозии;
- Так же в составе латуни находится олово, являющееся дефицитным элементом, делая использование его в крупногабаритных конструкциях нецелесообразным. Бронза БрАЖМц10-3-1,5, относящаяся к классу алюминиевых бронз, не содержит в своём составе дефицитных элементов, а наоборот, – алюминий, широко распространённый металл;
- Важное достоинство бронзы – её меньший вес, относительно сталей;
- Несмотря на относительную дешевизну труб из углеродистых сталей, стоимость их монтажа превосходит стоимость монтажа труб из меди и полипропилен (350 руб/п. м. и 165 руб/п. м., соответственно).

Вывод

Трубы из представленных материалов могут применяться для изготовления трубопровода морской воды в соответствии с их степенью ответственности (т.е. надёжности) и требуемого режима работы.

Список условных обозначений

- P* – глубинный показатель коррозионной стойкости, мм/год;
K_{mass} – массовый показатель коррозионной стойкости, г/м²·ч;
ρ – плотность материала, г/см³;
P – внутреннее давление, МПа;
V – временное сопротивление при разрыве, МПа;
δ – толщина стенки трубы, мм;
D – диаметр трубы, мм;
Q – расход жидкости, м³/ч;
ω – скорость потока, м/с;
M – масса трубы, кг;
L – длина трубы, м.