

ООО «Группа «ПОЛИПЛАСТИК»

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
ООО «Группа «ПОЛИПЛАСТИК»



М.И. Горилловский

20 декабря 2012

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

СТО 73011750-010-2012

Рекомендации по проектированию и монтажу
полиэтиленовых трубопроводов при их подводной
прокладке (дюкерные переходы)

Дата введения с 20.12. 2012

«СОГЛАСОВАНО»

«РАЗРАБОТАНО»

ОАО «Сибгипрокоммуниводоканал»
Генеральный директор

ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК»
Заместитель исполнительного директора



В.Ю. Капкайкин

20 декабря 2012

Е.В. Бутринов

20 декабря 2012

Ведущий инженер

20 декабря 2012

Г.В. Сыгуров

Москва 2012

ПРЕДИСЛОВИЕ

1 РАЗРАБОТАН Обществом с ограниченной ответственностью

«Группа «ПОЛИПЛАСТИК»

Заместитель исполнительного директора Е.В. Бутринов,

Ведущий инженер Г.В. Сыгуров.

2 ВНЕСЕН Отделом технической поддержки и экспертизы - разработчиком стандарта

3 ПРИНЯТ _____

4 ВВЕДЕН впервые _____

5 СОГЛАСОВАН Генеральный директор Открытого Акционерного

Общества «Сибгипрокоммунводоканал» В.Ю. Капкайкин

6 Настоящий стандарт организации не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен без разрешения ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК»

Разработка, согласование, утверждение, издание (тиражирование), обновление (изменение или пересмотр) и отмена настоящего стандарта производится организацией–разработчиком ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК»

© ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК», 2012 год

Содержание

	ВВЕДЕНИЕ.....	5
1	Общая информация.....	6
1.1	Различные типы подводных трубопроводов.....	6
1.1.1	Впускной трубопровод.....	7
1.1.2	Транзитный трубопровод.....	7
1.1.3	Водоотводящий трубопровод.....	8
2	Особенности проектирования дюкеров.....	10
2.1	Основные термины и показатели для проектирования полиэтиленовых трубопроводов.....	10
2.2	Гидравлический расчет.....	14
2.2.1	Коэффициент трения.....	14
2.2.2	Коэффициенты местных потерь напора.....	16
2.2.3	Потеря напора из-за разной плотности.....	17
2.2.4	Гидравлическая мощность.....	18
2.2.5	Скорость самоочищения.....	19
2.2.6	Транспортировка воздуха.....	20
2.3	Статический расчет.....	21
2.3.1	Внутреннее давление.....	21
2.3.1.1	Радиальное направление.....	22
2.3.1.2	Продольное направление.....	23
2.3.2	Внешние нагрузки / потеря устойчивости трубы.....	24
2.3.2.1	Потеря устойчивости незакрепленных труб.....	25
2.3.2.2	Потеря устойчивости труб в траншее / под давлением грунта.....	27
2.3.3	Гидроудар.....	28
2.3.4	Температурные напряжения.....	30
2.3.5	Напряжения при изгибе.....	31
2.3.5.1	Потеря устойчивости труб при изгибе.....	32
2.3.6	Дополнительные напряжения.....	34
2.3.6.1	Силы течения и воздействия волн.....	35
2.3.6.2	Подвешенное состояние трубопровода.....	35
2.3.6.3	Сосредоточенные нагрузки.....	35
2.3.7	Комбинированные нагрузки.....	36
2.4	Расчет нагрузки от бетонных пригрузов.....	37
2.4.1	Степень нагрузки.....	37
2.4.2	Типы бетонных пригрузов.....	39
2.4.3	Устойчивость полиэтиленового трубопровода на дне.....	40
2.4.4	Рекомендуемая степень заполнения воздухом для подводных трубопроводов.....	42
2.4.5	Силы течения.....	43
2.4.6	Волновые нагрузки.....	45
2.5	Расчет параметров процесса погружения.....	52
2.5.1	Внутренне давление воздуха.....	53
2.5.2	Тяговое усилие.....	53
2.5.3	Скорость погружения.....	55
3	Установка полиэтиленовых трубопроводов.....	60
3.1	Соединение полиэтиленовых труб.....	60
3.2	Установка.....	60
3.2.1	Погружение полиэтиленовых труб.....	60
3.2.2	Установка трубы на дне.....	64
4	Библиография.....	67

Приложение 1 (справочное) Описание конкретного проекта.....	68
Приложение 2 (справочное) Примеры расчетов к разделу 2.2.....	77
Приложение 3 (справочное) Примеры расчетов к разделу 2.3.....	82
Приложение 4 (справочное) Примеры расчетов к разделу 2.4.....	91
Приложение 5 (справочное) Примеры расчетов к разделу 2.5.....	97

ВВЕДЕНИЕ

Настоящий Стандарт разработан в соответствии с Федеральным законом «О техническом регулировании» № 184 - ФЗ от 27 декабря 2002 г. и предназначен для специалистов ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК», а также Заказывающих, Проектных и Подрядных организаций, решающих вопросы проектирования и строительства дюкерных переходов из полиэтиленовых труб, а также их ремонта или реконструкции.

Стандарт организации на проектирование и строительство дюкерных переходов из полиэтиленовых труб разработан ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК» на основе отраслевых методических и нормативных документов по применению пластмассовых труб в строительстве и на основе обобщения опыта строительных организаций и оформлен в соответствии с ГОСТ 1.5-5004.

Настоящий документ содержит рекомендации по проектированию и строительству дюкерных переходов с применением полиэтиленовых труб, полиэтиленовых фитингов и колодцев, выпускаемых предприятиями, входящими в состав ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК».

Организация-разработчик не несет ответственности за использование данного Стандарта организациями, не имеющими сертификатов соответствия.

Необходимость разработки Стандарта продиктована тем, что опыт, накопленный ООО «Группа ПОЛИПЛАСТИК», а также отечественными предприятиями и организациями по проектированию и строительству дюкерных переходов из полиэтиленовых труб, а также их ремонту, реконструкции, расчету, содержится во многих разрозненных нормативных документах, частично устаревших и не охватывающих в целом проблему.

Основной целью Стандарта является создание современной нормативной базы по вопросам проектирования и строительства дюкерных переходов из полиэтиленовых труб, а также по вопросам ремонта и реконструкции для поддержания их работоспособного состояния.

При разработке Стандарта проанализированы и учтены:

- законодательная, правовая и нормативно-методическая документация по вопросам проектирования, строительства, ремонта и реконструкции дюкерных переходов из полиэтиленовых труб;
- современный опыт проектирования, строительства, ремонта и эксплуатации дюкерных переходов;
- результаты обследования дюкерных переходов различных промышленных объектов;
- зарубежные стандарты, материалы и сайты фирм;
- предложения предприятий, организаций и специалистов.

1. ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Описание различных типов подводного применения полиэтиленовых труб.

Дюкерные переходы из полиэтиленовых труб используются для транспортировки питьевой воды и сточных вод с 1960 года. Трубы изготавливались длиной 12 метров, соединенные между собой при помощи сварки, утяжелялись бетонными пригрузами и погружались на дно водоема путем заполнения воды с одного конца и освобождения воздуха с другого конца.

В настоящее время методика не изменилась. Однако акцентировано внимание на проектировании и расчетах для обеспечения безопасной установки и избежания убытков.

Для оптимизации работ целесообразным является использование длинных отрезков трубы (до 500 метров), непрерывно экструдированных на заводе, сопряженных при помощи фланцевого соединения и буксируемой на судне на стройплощадку.

Это решение успешно используется в зарубежных проектах.

С 1960 года наблюдается также существенное улучшение в развитии сырьевых материалов и методов производства.

Поэтому полиэтилен является сегодня наиболее предпочтительным материалом трубы для дюкерных переходов. Сочетание гибкости и прочности делает его лучше других материалов.

В некоторых странах Европы более 95% дюкеров от количества всех подводных трубопроводов выполнены именно из полиэтиленовых труб. Диаметры варьируются в пределах $\varnothing 50$ мм – $\varnothing 1600$ мм, а глубина может в отдельных случаях достигать 250 метров.

Настоящие рекомендации посвящены вопросам проектирования.

Здесь можно найти методики и формулы, которые позволят рассчитать и решить наиболее распространенные проблемы, возникающие в подводных трубопроводных проектах.

Однако, как введение, сначала упоминаются различные типы подводных конструкций, а в конце кратко описывается типичный пример проекта погружения трубопровода.

1.1 Различные типы подводных трубопроводов

Если исходить из направления транспортировки для потребителей воды, то можно разделить конструкции на 3 категории:

- впускной трубопровод;
- транзитный трубопровод;
- водоотводящий трубопровод.

1.1.1 Впускной трубопровод

Впускной трубопровод используется для промышленных и гражданских нужд. Источником могут быть реки, озера и заливы. Глубина впуска варьируется от 2 до 250 м. В некоторых случаях впускной трубопровод подключается непосредственно к помпе насосной станции.

Впускной трубопровод всегда подвержен отрицательному давлению.

Характерные проблемы, которые необходимо знать:

- пониженное давление;
- загрязнение;
- выпуск воздуха;
- течение;
- колебания.

На рисунке 1.1.1 показан пример водозабора из водоёма. Трубопровод диаметром 1200 мм и протяженностью 3 километра. Материал трубы ПЭ80 SDR26.

Пропускная способность составляет 1,5 м³/с. Весь трубопровод для защиты от течения, эрозии, льда и прочего лежит в траншее глубиной 2-3 метра. Полиэтиленовые трубы были выбраны в силу их гибкости, прочности и простоты установки.

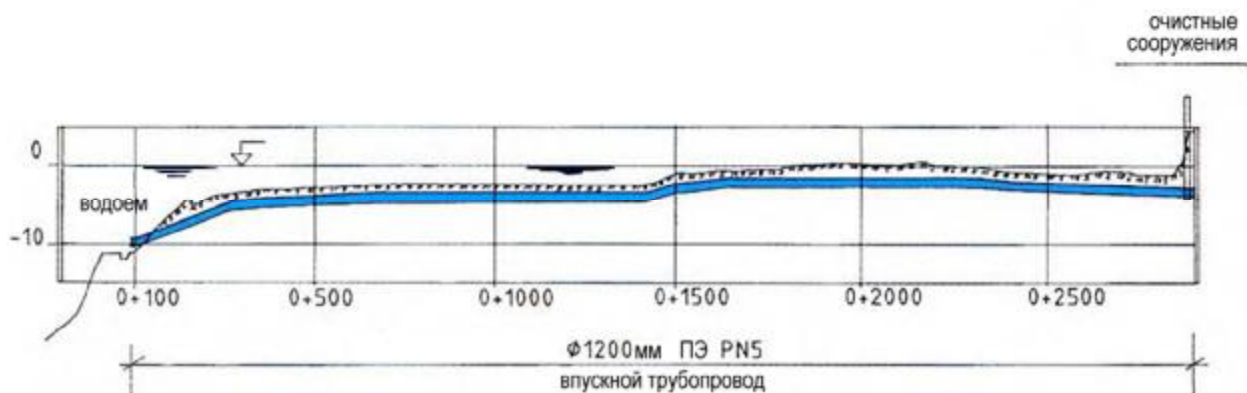


Рисунок 1.1.1 – Водозабор из реки

1.1.2 Транзитный трубопровод

Во многих случаях транзитный трубопровод может быть выполнен при пересечении водоёмов с помощью дюкеров вместо использования более длинного пути по береговой линии.

В других случаях он необходим, чтобы пересекать реки и моря для снабжения городов водой или для удаления сточных вод.

Вода может быть транспортирована под воздействием гравитационных сил (самотеком), либо с помощью насосов. Во время работы всегда есть избыточное давление в трубе, не говоря о случае с гидравлическим ударом.

Обычно устанавливаются смотровые колодцы/шахты на каждом берегу для состыковки дюкера. Оборудование в шахтах зависит от типа трубопровода. Как правило, устанавливают запорную арматуру.

Характерные проблемы, которые необходимо знать о транзитных трубопроводах:

- давление;
- наличие воздуха;
- скорость течения;
- колебания;
- рыбозащитное оборудование;
- возможность механического повреждения.

Рисунок 1.1.2 показывает пример пересечения реки. На рисунке показан профиль канализационного трубопровода из полиэтилена. Диаметр трубопровода составляет 630мм, толщина стенки 37,4 мм (PN10), длина 450 метров. Пятиметровая глубина трубопроводной траншеи на дне реки является необходимой для предотвращения повреждения трубопровода якорями водного транспорта. Полиэтиленовая труба была выбрана из-за её гибкости.

После погружения траншея была заполнена гравием.

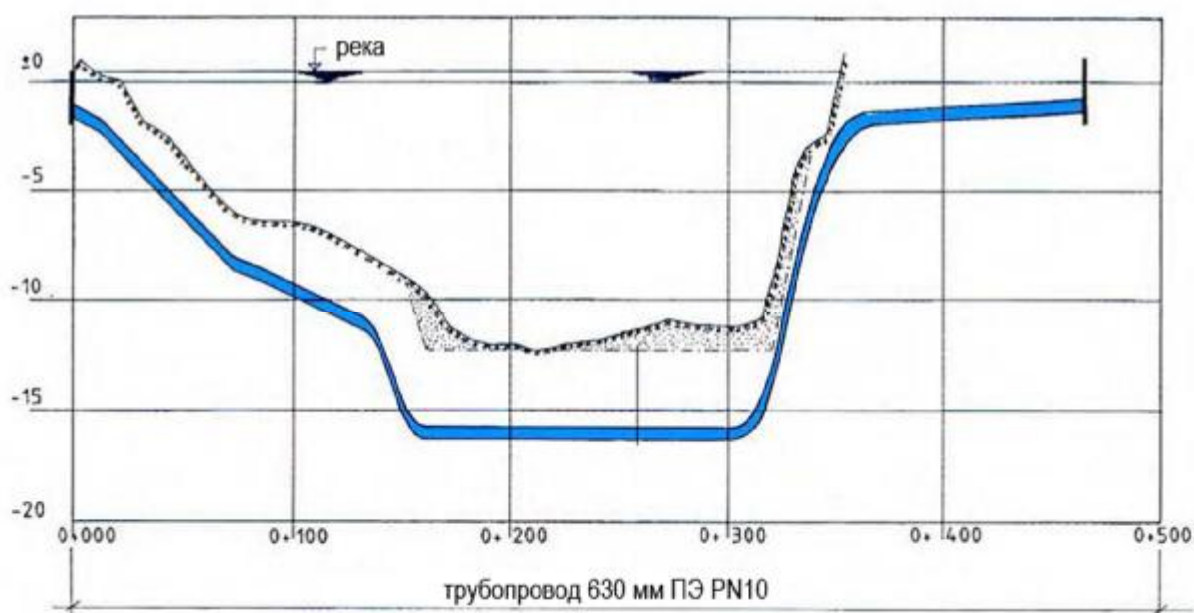


Рисунок 1.1.2 – Переход канализации через реку

1.1.3 Водоотводящий трубопровод

Очищенные сточные воды, как правило, будут перемещены в зону приема выбросов на определенной глубине и расстоянии от берега. Глубоководный выпуск будет обеспечивать отличное разбавление (диффузию) сточных вод. Глубина выпуска варьируется в диапазоне 10-60 метров и зависит от потенциала самоочищения получателя (водоема). Получателем могут быть реки, озера, заливы или моря.

Выпуск, как правило, начинается от выпускной камеры на берегу, к которой сточные воды подводят под действием силы тяжести или с помощью подачи насосами.

Использование нагнетания непосредственно в водоотводящий трубопровод довольно редко и не рекомендуется. Если нагнетание необходимо, то наилучшим решением является откачка сточных вод во впускную камеру и отведение их с помощью силы тяжести к получателю (водоему).

Главная задача для впускной камеры состоит в предотвращении попадания воздуха в трубопровод.

Воздух может вызывать дополнительную плавучесть трубы из-за выталкивающей силы.

Кроме того, необходимо принять во внимание отливы и приливы при проектировании впускной камеры.

Характерные проблемы, принимаемые во внимание относительно водоотводящих трубопроводов:

- вовлечение воздуха в поток трубы;
- биозасорение;
- силы, вызванные течением и волнами;
- транспортировка отложений (осадков).

На рисунке 1.1.3 показана примерная система водоотвода в море. Основными компонентами данного примера в системе водоотвода являются:

- полиэтиленовая труба диаметром 1600 мм, проложенная на морском дне на глубине 4м. Конец полиэтиленового трубопровода со стороны моря связан с железобетонной анкерной опорой. Край трубопровода со стороны берега соединен с выпускной камерой.
- полиэтиленовая труба диаметром 1600 мм на круто уходящем вниз морском дне от анкерной опоры до глубины 30метров.

Полиэтилен был выбран по сравнению с другими материалами труб, из-за его гибкости и из-за того, что он снижает трудоемкость строительных работ под водой.

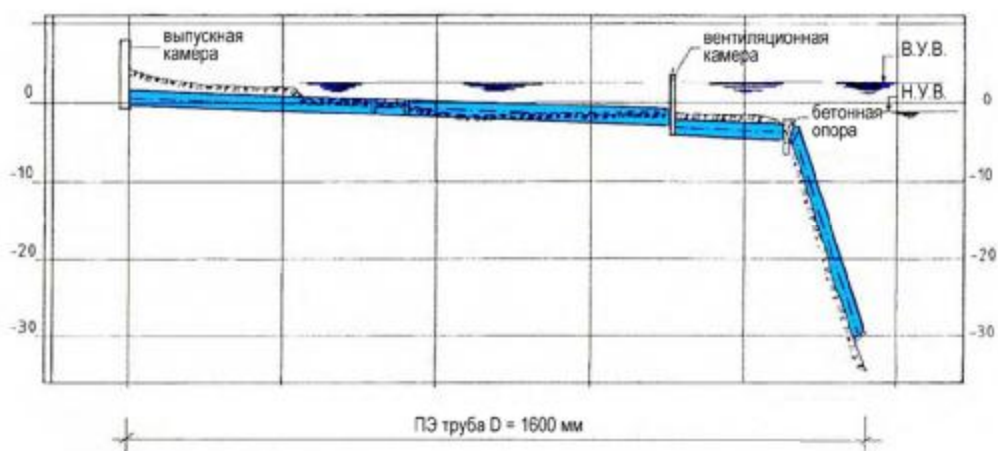


Рисунок 1.1.3 – Система водоотвода в море

2 ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЮКЕРОВ

2.1 Основные термины и показатели для проектирования полиэтиленовых трубопроводов

Для проведения расчетов необходимы показатели механических свойств. Основные механические свойства описываются показателями:

E_0 – кратковременный модуль упругости (МПа);

E_T – долговременный модуль упругости (МПа);

σ_0 – предел прочности в начальный момент времени (МПа);

σ_c – предел ползучести в момент $t > 0$ (МПа) (также называемый разрушающее напряжение);

ν – коэффициент Пуассона = $\frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_r}$;

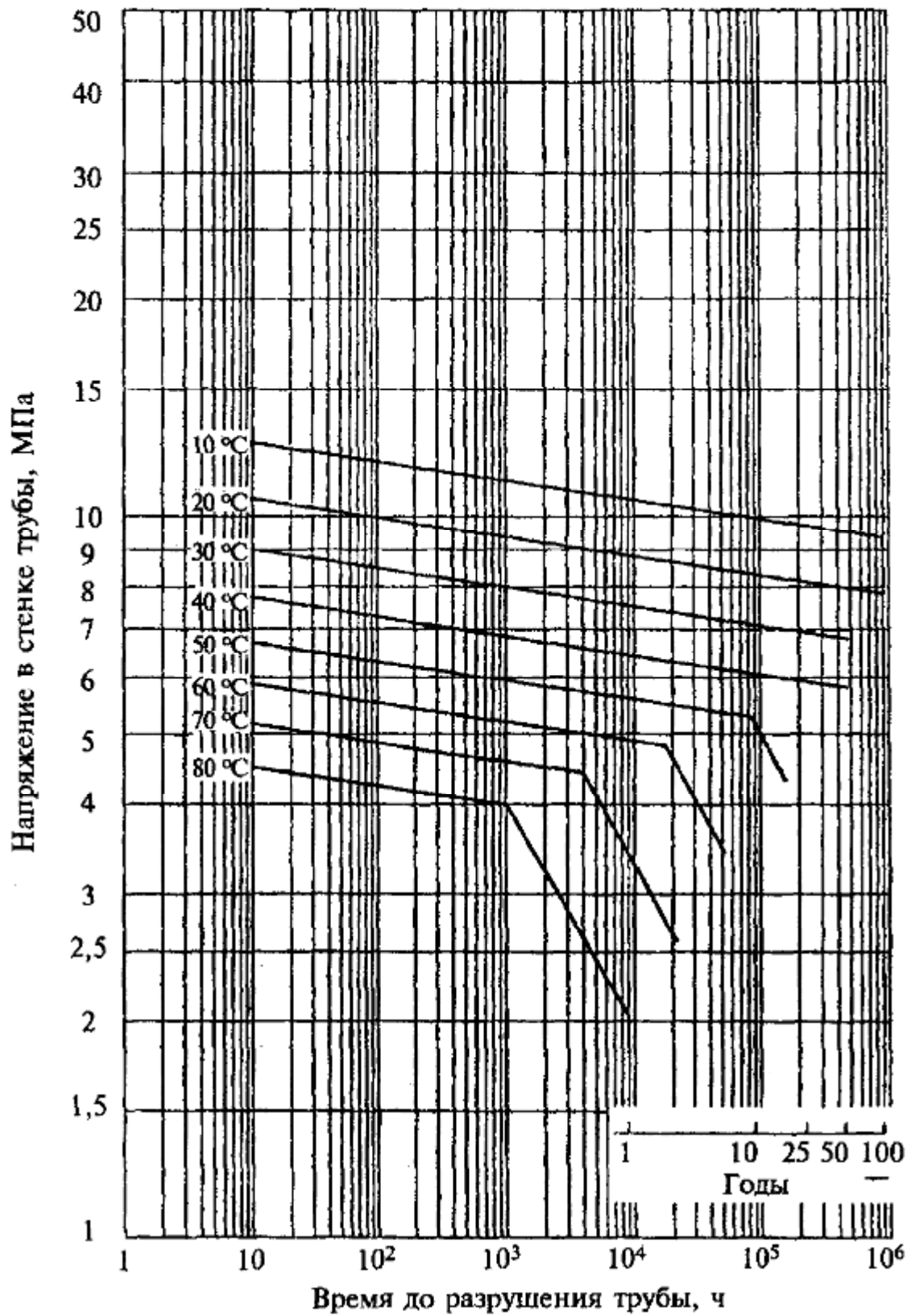
ε_l – деформации в осевом направлении;

ε_r – деформации в радиальном направлении;

α – температурное расширение ($^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Механические свойства для полиэтиленовых труб также зависят от температуры. Как правило, свойства приведены при 20°C или 23°C .

На рисунках 2.1.1 и 2.1.2 приведены эталонные кривые длительной прочности труб из ПЭ80 и ПЭ100.



Левая часть ломаной: $\lg(t) = -40,9578 + 23596,3495/T - 37,5758 \lg(\sigma)$

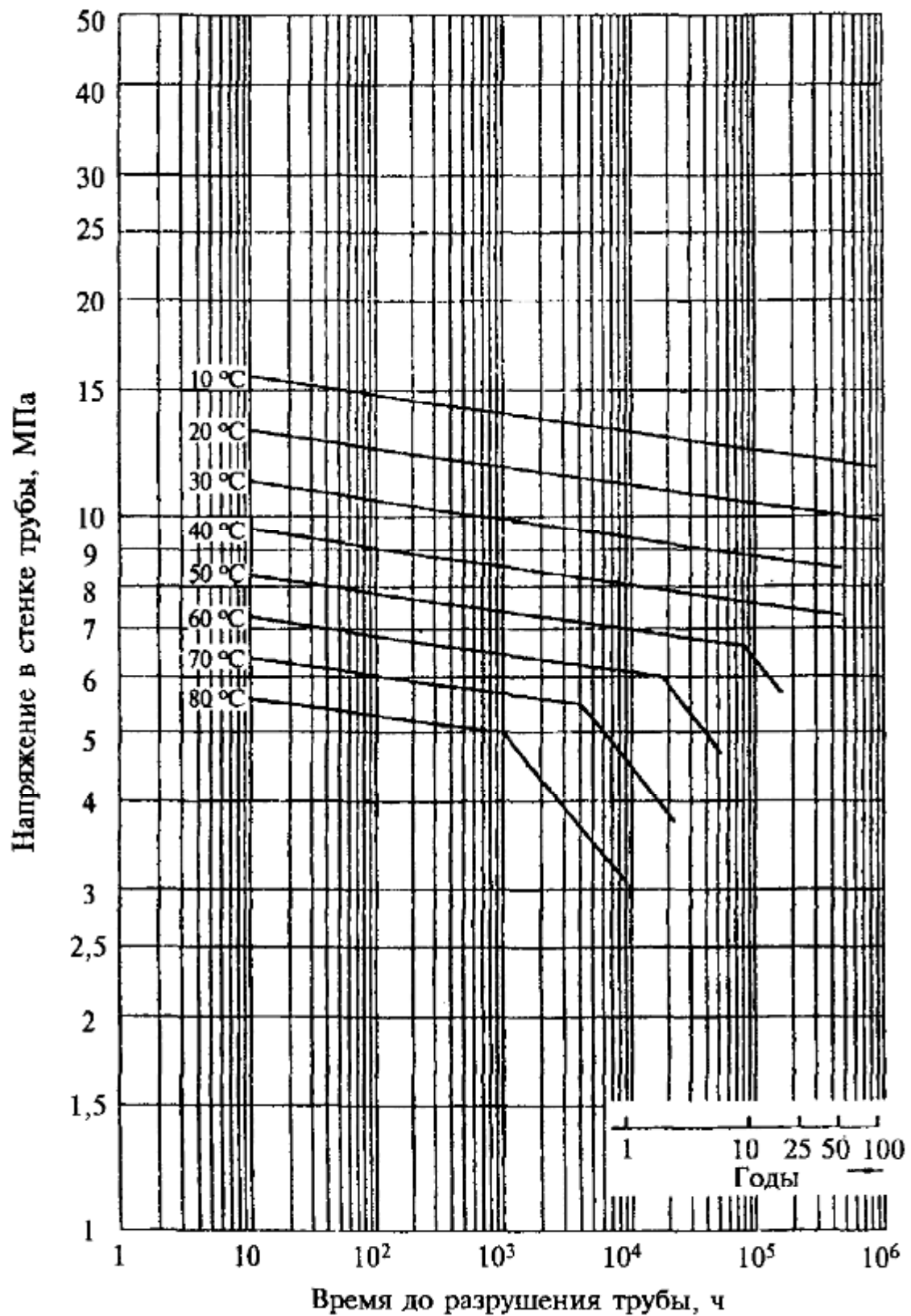
Правая часть ломаной: $\lg(t) = -19,9417 + 8804,4333/T - 3,3219 \lg(\sigma)$,

где t — время, ч;

T — температура, К;

σ — напряжение в стенке трубы, МПа

Рисунок 2.1.1 – Эталонные кривые длительной прочности труб из PE 80



Левая часть ломаной: $\lg(t) = -38,9375 + 24482,4670/T - 38,9789 \lg(\sigma)$

Правая часть ломаной: $\lg(t) = -20,3159 + 9342,6930/T - 4,5076 \lg(\sigma)$,

где t — время, ч;

T — температура, К;

σ — напряжение в стенке трубы, МПа

Рисунок 2.1.2 – Эталонные кривые длительной прочности труб из PE 100

Для полиэтиленовых труб, в качестве срока службы, как правило, выбирают 50 лет.

Расчетное напряжение σ_d вводится по формуле:

$$\sigma_d = \frac{\sigma_{C,50 \text{ лет}}}{C} \quad (2.1-1)$$

$\sigma_{C,50 \text{ лет}}$ – предел прочности (предел ползучести) для полиэтилена при постоянной нагрузке в 50 лет;

C – расчетный коэффициент (коэффициент безопасности).

Коэффициент безопасности варьируется в зависимости от различных стандартов.

Обычно значение $C = 1,25 \dots 1,6$.

Материалы ПЭ80 и ПЭ100 имеют предел прочности при постоянном напряжении в 50 лет при 20 °С 8 МПа и 10 МПа, соответственно.

Таблица 2.1.1 – Расчетное напряжение.

Материал	Расчетное напряжение	
	$C = 1,6$	$C = 1,25$
PE80	5,0 МПа	6,4 МПа
PE100	6,3 МПа	8,0 МПа

Для подводных трубопроводов обычно используется расчетный коэффициент 1,6.

В таблице 2.1.2 перечисляются основные механические свойства для полиэтилена, которые будут использоваться в расчетах ($T = 20$ °С).

Таблица 2.1.2 – Механические свойства для полиэтиленовых труб

Характеристика		Единица измерения	ПЭ80	ПЭ100
Плотность при 23 °С базовой марки, не менее		кг/м ³	930	945
Расчетное напряжение 50 лет	$\sigma_{d,50}$	МПа	5,0/6,4 *	6,3/8,0*
Расчетное кратковременное напряжение	$\sigma_{d,0}$	МПа	8,0/10,4 *	9,4/12,0 *
Кратковременный модуль упругости	E_0	МПа	800	1050
Долговременный модуль упругости	E_{50}	МПа	200	200
Коэффициент Пуассона	ν	-	0,42-0,44	0,42-0,44
Средний коэффициент температурного расширения	α	°С ⁻¹	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$

* учитывая коэффициент безопасности 1,6 и 1,25 соответственно

Новая труба будет иметь низкую шероховатость, но со временем может происходить загрязнение, которое повышает коэффициент шероховатости.

Качество воды, проходящей через трубопровод, имеет большое значение для образования шероховатости. Имеется различие между питьевой водой и сточными водами.

В таблице 2.1.3 представлены расчетные значения эквивалентной шероховатости на основе опыта.

Таблица 2.1.3 – Расчетные значения для эквивалентной шероховатости (ϵ)

Тип воды	Тип полиэтиленового трубопровода		
	Впускной	Транзитный	Выпускной
Питьевая	2мм	0,25мм	-
Сточная	-	0,50мм	1мм

Если трубы регулярно промываются струёй совместно с применением прочистного ерша, то значения в таблице 2.1.3 могут быть уменьшены.

2.2 Гидравлический расчет

Падение давления в трубопроводе (Δh) в целом можно описать формулой:

$$\Delta h = f \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} + \sum k \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} + \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \cdot y \quad (2.2-1)$$

f – коэффициент трения (см. диаграмму на рисунке 2.2.1);

L – длина трубы (м);

D – внутренний диаметр (м);

V – скорость в трубе (м/с);

g – ускорение свободного падения ($= 9,81 \text{ м/с}^2$);

$\sum k$ – сумма коэффициентов для единичных потерь напора;

$\Delta \rho$ – разность плотности воды в трубе и воды водоёма (кг/м^3);

ρ_0 – плотность воды в трубе (кг/м^3);

y – глубина воды на выходной точке в водоёме.

2.2.1 Коэффициент трения

Коэффициент трения f зависит от числа Рейнольдса Re :

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (2.2-2)$$

V – скорость;

D – внутренний диаметр (м);

ν – вязкость воды ($\text{м}^2/\text{с}$).

Вязкость воды зависит от температуры.

$$T = 20^{\circ}\text{C} \quad \nu = 1.0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

$$T = 10^{\circ}\text{C} \quad \nu = 1.3 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

Рекомендуется применять значение для 10⁰С.

Скорость V можно рассчитать по формуле:

$$V = \frac{4 \cdot Q}{\pi D^2} \tag{2.2-3}$$

Q – расход (м³/с).

Как видно, число Рейнольдса можно вычислить, если известен расход и внутренний диаметр.

Когда число Рейнольдса известно, коэффициент трения может быть найден из графика Мууди, рисунка 2.2.1.

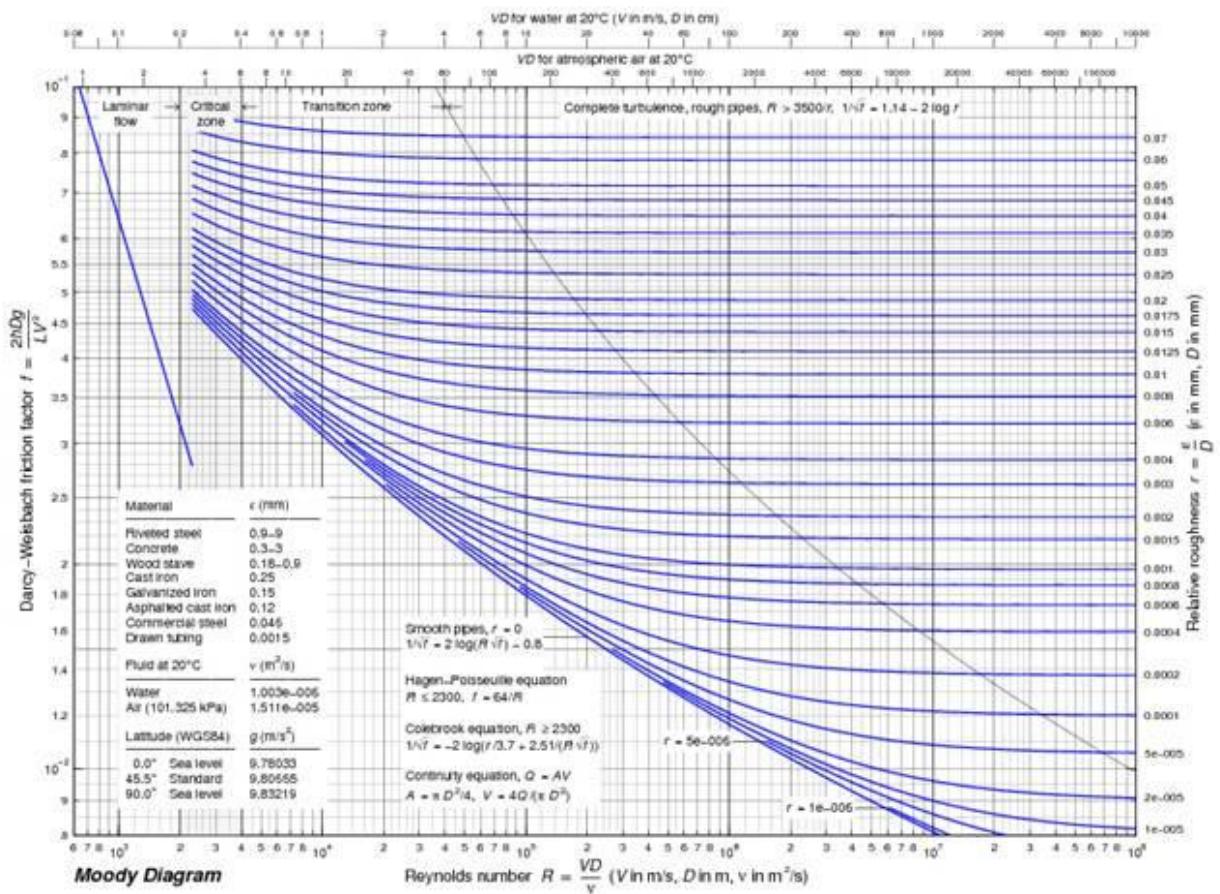


Рисунок 2.2.1 – Диаграмма Мууди – диаграмма, представляющая показатель трения стенок трубы как функцию числа Рейнольдса при различной степени шероховатости

Входным параметром на горизонтальной оси является число Рейнольдса.

Чтобы подобрать правильную кривую, необходимо найти относительную шероховатость r_r для трубы.

$$r_r = \frac{\varepsilon}{D} \quad (2.2-4)$$

ε – абсолютная шероховатость, взятая из таблицы 2.1.3 (мм);

D – внутренний диаметр (мм).

С правой стороны на диаграмме Муди находятся показатели относительной шероховатости, отображающие различные кривые.

Точка пересечения между числом Рейнольдса и кривой относительной шероховатости дает коэффициент трения f . Значение f находится слева на вертикальной оси.

Зная f , можно рассчитать потери напора из-за трения Δh_f для трубопровода из первой части формулы (2.2-1)

$$\Delta h_f = f \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (2.2-5)$$

Чтобы преобразовать это значение в Па (Н/м^2) введем отношение:

$$p = \rho \cdot g \cdot h \quad (2.2-6)$$

p – давление ($\text{Н/м}^2 = \text{Па}$);

ρ – плотность воды (1000 кг/м^3);

g – ускорение свободного падения ($9,81 \text{ м/с}^2$).

2.2.2 Коэффициенты местных потерь напора

Вторая часть формулы (2.2-1) представляют собой особые потери давления (Δh_s):

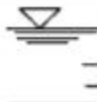




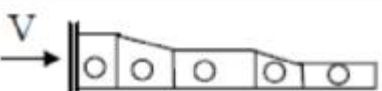

$$\Delta h_s = \sum k \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (2.2-7)$$

Выражение $\sum k$ означает сумму дискретных потерь напора.

Потери напора возникают, например, в поворотах, при изменении диаметра, на входе и выходе из трубы, из-за сварных швов, в вентилях, в решётках, в счетчиках расхода воды, а также в диффузорах.

В таблице 2.2.2 приведены соответствующие значения для данных коэффициентов.

Таблица 2.2.2 – Сопутствующие коэффициенты для местных потерь напора

Местные потери напора		Коэффициент k
	Впуск 1	$k = 1,0$
	Впуск 2	$k = 0,5$
	Выпуск	$k = 1,0$
	Отвод	$k = 1,1 \cdot \left(\frac{\theta}{90^\circ}\right)^2$
	Изгиб	$k = 0,2 \cdot \sin \theta$ (острый) $k = 0,1 \cdot \sin \theta$ (плавный)
	Диффузор	$k = 16$
	Сороудерживающая решётка	$k = 0,03$
Сварной шов		$k = 0,03$
Запорный клапан (открыт)		$k = 0,2$
Обратный клапан		$k = 10$

2.2.3 Потеря напора из-за разной плотности

Третий член в формуле (2.2-1) описывает потерю напора из-за разницы в плотности (так называемое морское сопротивление), когда вода течет к получателю, где плотность воды (например, морская вода) выше.

$$\Delta h_p = \frac{\Delta \rho}{\rho_0} \cdot y \quad (2.2-8)$$

Этот термин обычно принимают во внимание только когда речь идет о водоотводящем трубопроводе и если есть разница в плотности между сточными водами и водами получателя.

Разница в плотности может быть связана с содержанием соли в воде или разницы в температуре.

Морское сопротивление иногда достигает значительной величины и должно приниматься во внимание для водоотводящих трубопроводов.

2.2.4 Гидравлическая мощность

В предыдущих главах приведены формулы расчета перепада давления для заданного диаметра и заданной расчетной гидравлической нагрузки.

Иногда ситуация обратная. Известно давление и расход, а необходимо узнать фактический диаметр.

Поэтому необходимо вычислить диаметр по формуле (2.2-1) и (2.2-3).

Это дает уравнение:

$$g \cdot \left(\Delta h - \frac{\Delta p}{\rho_0} \cdot y \right) \cdot \pi^2 \cdot D^5 - \sum k \cdot 8 \cdot Q^2 \cdot D - 8 \cdot f \cdot Q^2 \cdot L = 0 \quad (2.2-9)$$

Уравнение 5 степени для диаметра D не может быть решено однозначно.

Поэтому следует упростить.

Так как единичные потери напора обычно малы, по сравнению с потерями на трение, можно пренебречь вторым членом в формуле (2.2-9) и найти примерный диаметр:

$$D = \left[\frac{8 \cdot f \cdot Q^2 \cdot L}{g \cdot \left(\Delta h - \frac{\Delta p}{\rho_0} \cdot y \right) \cdot \pi^2} \right]^{\frac{1}{5}} \quad (2.2-10)$$

После того как определён теоретический диаметр в (2.2-10), выбирается ближайший стандартный диаметр в рамках сортамента производителей, округляя в большую сторону.

Этот диаметр подставляется в формулу (2.2-1), чтобы проверить, что общее падение давления не превышает допустимого.

Существует другой способ – это определение расхода Q из уравнения (2.2-9)

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \left[\frac{2 \cdot \left(\Delta h - \frac{\Delta p}{\rho_0} \cdot y \right) \cdot D \cdot g}{f \cdot L + \sum k \cdot D} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.2-11)$$

В уравнении (2.2-11) на правой стороне останется неизвестным только диаметр D.

При выборе значения D пошагово, можно решить эту проблему путем итерации.

Диаметр D, который дает верную величину расхода Q, является решением уравнения.

Чтобы найти "начальное значение" в процессе итерации, следует начать с уравнения (2.2-10).

Зная поток и диаметр, необходимо контролировать на диаграмме (см. рис. 2.2.1) коэффициент трения.

В случае необходимости значение корректируется и проводится новая итерация.

По системе формул, описанных в главе 2.2, можно сделать точный гидравлический расчет для подводных трубопроводов.

В случаях, когда требуется оценка шероховатости, можно использовать диаграммы, основанные на работах Коулбрука-Прандтля-Никурадзе. Они удобны более широким диапазоном диаметров (\varnothing 100-3000 мм) в отличие от номограмм (\varnothing 6-1200 мм). Однако, если необходим подбор параметров для диаметров 0-100, то использование диаграмм не возможно.

На рисунке 2.2.4 показан график для абсолютной шероховатости $k = 1,0$ мм [3].

Если известно изменение трения в ‰ ($= \frac{\Delta h}{L} \cdot 1000$), то можно найти нужный диаметр при условии, что расход тоже известен.

Можно найти одну из величин Q , Δh , D , если две из них известны. На графике также можно посмотреть соответствующую скорость.

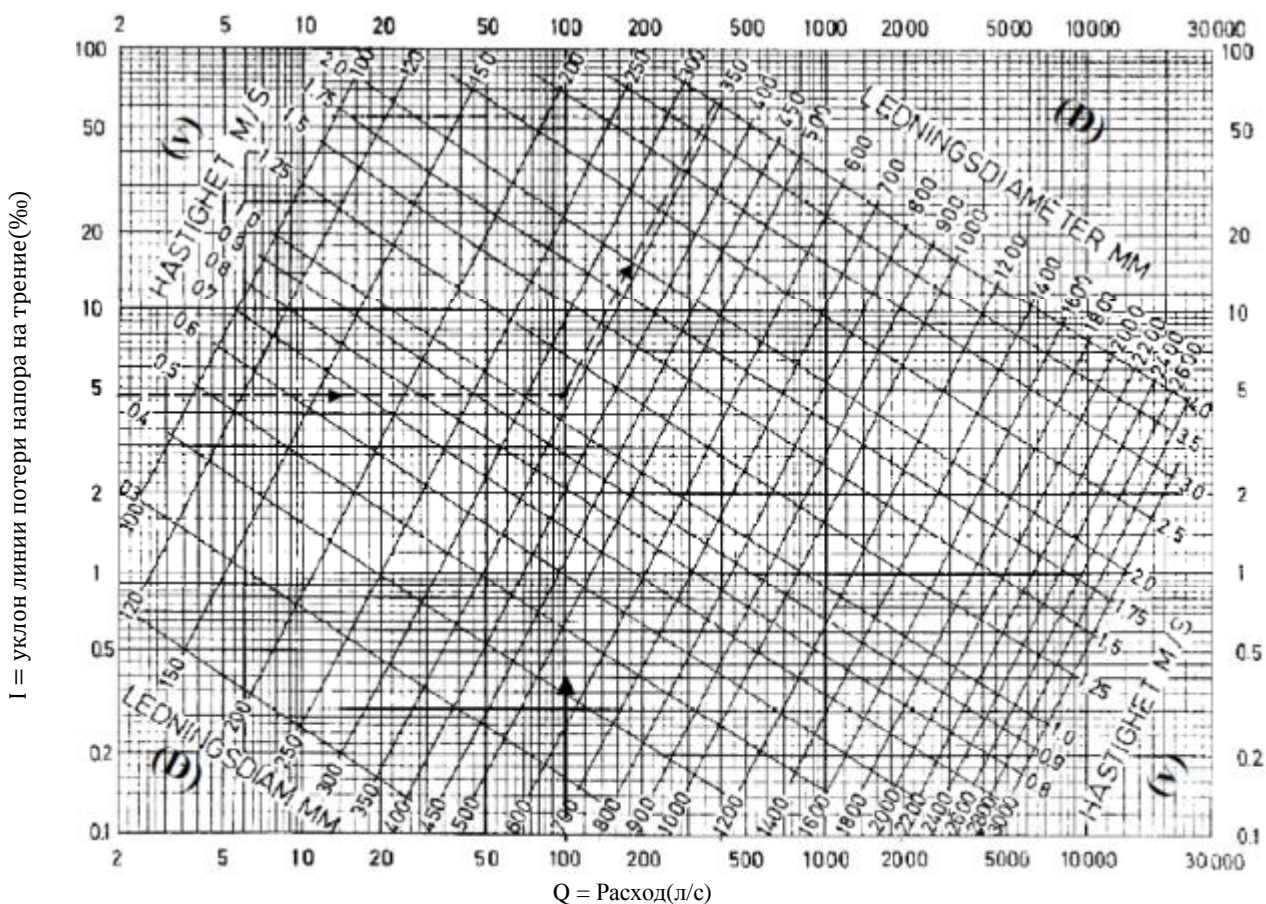


Рисунок 2.2.4 – Гидравлическая мощность, $\varepsilon = 1$ мм

2.2.5 Скорость самоочищения

Другим важным фактором для подводных трубопроводов является предотвращение отложений внутри трубы и накопления газа/воздуха.

Чтобы проверить способность трубопроводов для самоочищения, введем касательное напряжение τ :

$$\tau = \rho \cdot g \cdot \frac{D}{4} \cdot I \quad (2.2-12)$$

- ρ – плотность воды (кг/м^3);
 g – ускорение свободного падения ($= 9,81 \text{ м/с}^2$);
 D – внутренний диаметр (м);
 $I = \frac{\Delta h}{L}$ – уклон линии потери напора на трение.

Для самоочищения касательное напряжение должно быть $\geq 4 \text{ Н/м}^2$.

2.2.6 Транспортировка воздуха

Воздушные и газовые скопления являются частой проблемой для подводных трубопроводов.

Чтобы справиться с данной проблемой существует два возможных решения:

- 1) предотвратить попадание воздуха в трубопровод;
- 2) обеспечить достаточную скорость в трубопроводе для транспортировки воздуха и газа по трубопроводу.

Скопление газа или воздуха в трубопроводе может привести к:

- уменьшению гидравлической мощности;
- флотации или вертикальному смещению трубопровода.

Если это возможно, рекомендуется способ 1), который является более безопасным решением.

В водоотводящем трубопроводе выпускная камера должна быть построена таким образом, чтобы воздух не мог проникнуть в трубопровод. Для этого следует принимать во внимание следующее:

- наиболее низкий уровень воды в получателе/источнике;
- вихревые потоки (завихрения);
- колебания уровня воды в результате внезапного изменения в подаче (расходе).

Для транзитных трубопроводов должна быть обеспечена возможность удаления воздуха в колодцах/камерах на береговой линии при запуске, во время нормальной работы и в случае ремонтных работ.

В способе 2), чтобы удалить пузырьки, присутствующие в трубе, должна быть найдена критическая скорость U_k в соответствии с потоком.

Критическая скорость воды U_k определяется по формуле:

$$U_k = f \cdot (D_i \cdot \sin \alpha) \quad (2.2-13)$$

D_i – внутренний диаметр трубы (м);
 α – уклон трубы.

Упрощенное выражение приводит U_k как зависимость от $\sqrt{g \cdot D_i}$

$$U_k = k \cdot \sqrt{g \cdot D_i} \quad (2.2-14)$$

g – ускорение свободного падения ($9,81 \text{ м/с}^2$).

Коэффициент k показан на рисунке 2.2.6 в зависимости от $\sqrt{\sin \alpha}$

Кривая k на рисунке 2.2.6 применяется для $\alpha = 0^\circ \rightarrow 90^\circ$

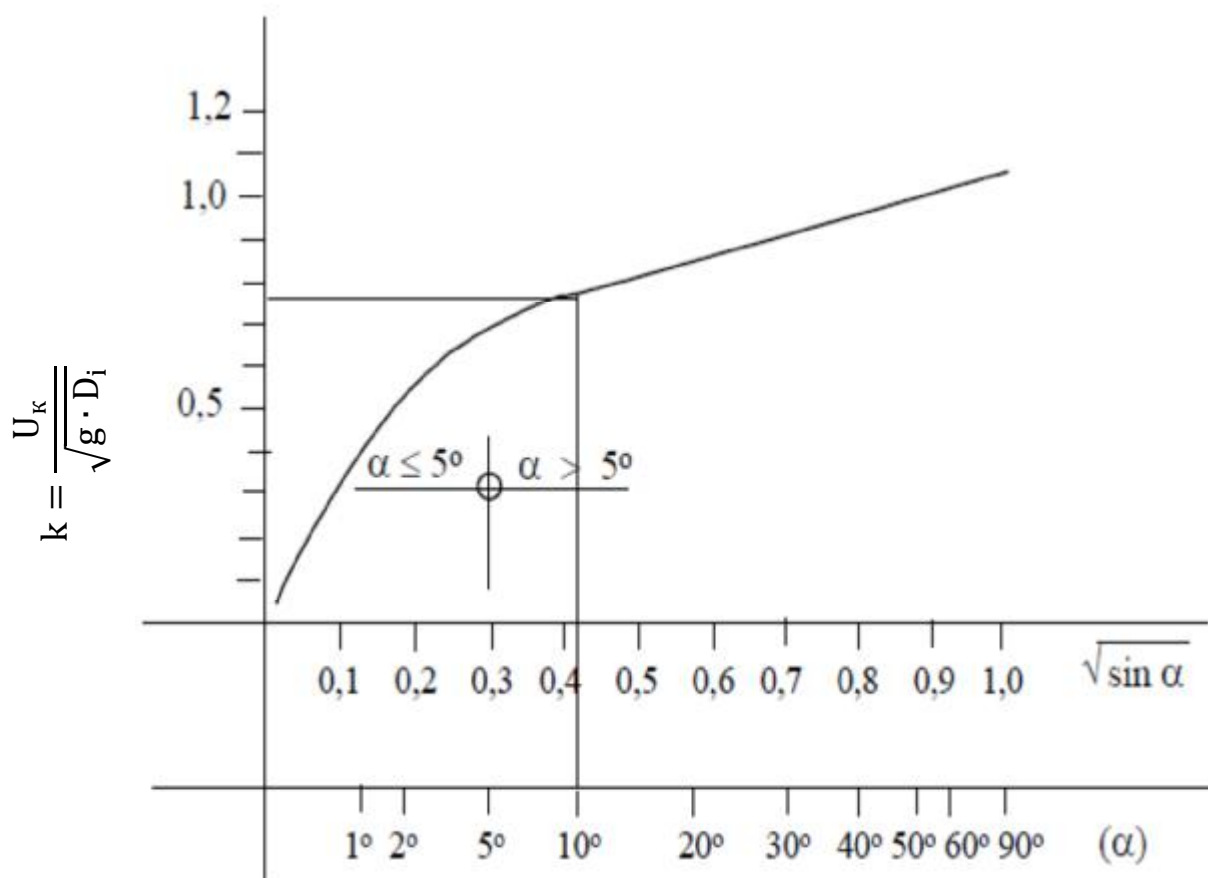


Рисунок 2.2.6 – Критическая скорость для транспортировки воздуха в трубопроводе

2.3 Статический расчет

В этой главе представлены формулы для определения толщины стенки трубы с учетом внутренних и внешних сил, действующих на трубопровод.

Внутренний диаметр трубы определяется по формулам, приведенным в главе 2.2.

Немногие из этих расчетов необходимы для выполнения в реальном проекте. Необходимо выделить важные факторы, касающиеся срока службы трубы.

2.3.1 Внутреннее давление

Внутреннее давление будет создавать напряжение в стенке трубы, как в радиальном направлении, так и в продольном направлении. Напряжение в продольном направлении зависит от возможности трубопровода перемещаться (фиксированный или подвижный).

2.3.1.1 Радиальное направление

На рис. 2.3.1.1 изображена статическая система.

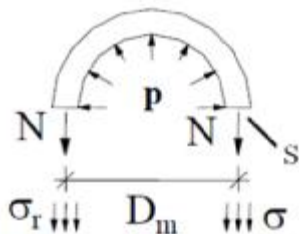


Рисунок 2.3.1.1 – Статическая система внутреннего давления

Из-за внутреннего давления отсутствует касательное напряжение. Там будет только сила натяжения в радиальном направлении.

Если объединить составляющие в уравнение, основанное на равновесии сил, то:

$$2 \cdot N = p \cdot D_m \quad (2.3-1)$$

N – сила натяжения (Н);

p – давление ($\text{Н/м}^2 = \text{Па}$);

D_m – средний диаметр (м).

Вводя радиальное напряжение σ_r и толщину стенки s , можно записать следующие формулы:

$$N = \sigma_r \cdot s \quad (2.3-2)$$

$$\sigma_r = \frac{p \cdot D_m}{2 \cdot s} \quad (2.3-3)$$

$$s = \frac{p \cdot D_m}{2 \cdot \sigma_r} \quad (2.3-4)$$

$$\text{Так как } D_m = D - s \quad s = \frac{p \cdot D}{(2 \cdot \sigma_r + p)} \quad (2.3-5)$$

σ_r – расчетное напряжение (см. таблицу 2.1.2);

D – наружный диаметр.

Напряжение σ для данной трубы в радиальном направлении подвергающейся давлению p , можно рассчитать по формуле:

$$\sigma_r = \frac{p}{2} (\text{SDR} - 1), \quad \text{где } \text{SDR} = \frac{D}{s} \quad (2.3-6)$$

Труба всегда подвергается дополнительным силам помимо внутреннего давления, например, температурным перепадам, усилиям при изгибе, давлению грунта засыпки в траншеях, гидравлическим ударам, силам течения и волн, монтажным усилиям и т.д.

Необходимо учитывать коэффициент безопасности (расчетный коэффициент), принимая во внимание все эти силы.

Методика отображает расчет всех действующих сил и обеспечивает нахождение максимального совокупного напряжения.

2.3.1.2 Продольное направление

На рисунке 2.3.1.2 показано напряжение и деформации для труб, подвергшихся внутреннему давлению.

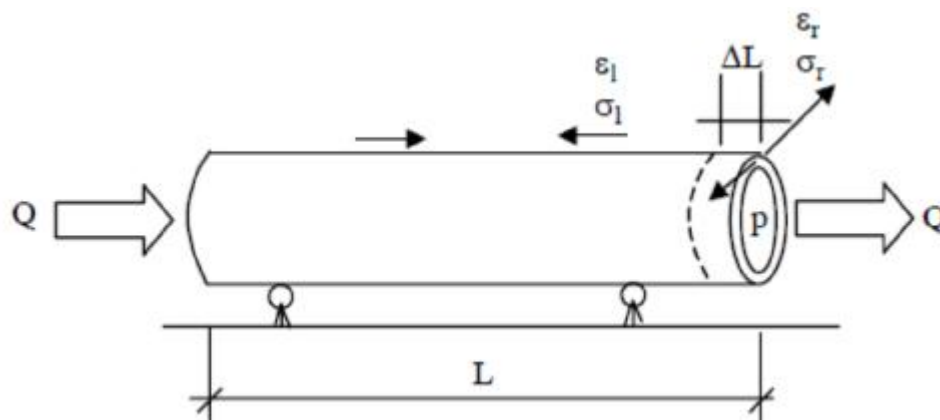


Рисунок 2.3.1.2 – Труба, подвергающаяся внутреннему давлению

Внутреннее давление приведёт к деформации в продольном направлении при условии, что труба может свободно перемещаться.

Будет происходить укорочение трубы:

$$\epsilon_1 = -\nu \cdot \epsilon_r \quad (2.3-7)$$

ϵ_1 – деформации в продольном направлении;
 ϵ_r – деформации в радиальном направлении;
 ν – коэффициент Пуассона (0,42-0,44).

Если сила трения, противодействующая передвижению, отсутствует, то будет отсутствовать и постоянное напряжение в продольном направлении и укорочение ΔL будет разложено, как показано в формуле (2.3-8). Данная формула применима для трубопровода в свободно плавающем положении:

$$\Delta L = -\nu \cdot L \cdot \epsilon_r \quad (2.3-8)$$

L – длина трубы.

Для оценки ϵ_r можно применить закон Гука:

$$\epsilon_r = \frac{\sigma_r}{E} \quad (2.3-9)$$

σ_r – напряжение в радиальном направлении (см. формулу (2.3-6));
 E – модуль упругости (см. таблицу 2.1.2).

Следовательно:

$$\epsilon_r = \frac{P}{2 \cdot E} (SDR - 1) \quad (2.3-10)$$

$$\Delta L = \frac{\nu \cdot L \cdot P}{2 \cdot E} (SDR - 1) \quad (2.3-11)$$

Изменение длины трубопровода может быть значительным. Если концевая стыковка такого трубопровода не является эластичной, то возможно произойдет протечка. Также видно, что результат не зависит от диаметра.

В большинстве случаев движение трубы предотвращается пригрузами, бетонными блоками, покровом почвы и т.д.

При этом будут возникать напряжения в продольном направлении.

Максимальное напряжение появляется, когда деформация равна нулю:

$$\sigma_{\text{Imax}} = \nu \cdot \sigma_r \quad (2.3-12)$$

$$\sigma_{\text{Imax}} = \frac{\nu p}{2} (\text{SDR} - 1) \quad (2.3-13)$$

Продольное напряжение может достигать половины значения радиального напряжения.

Напряжение в продольном направлении со временем из-за релаксации полиэтилена будет снижаться.

Это связано с остаточной деформацией, в то время как модуль E со временем уменьшается. Этот факт следует из закона Гука:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.3-14)$$

ε – постоянная;

σ, E – убывающие.

2.3.2 Внешние нагрузки / потеря устойчивости трубы

В этой главе рассматривается риск потери устойчивости полиэтиленовых труб, подверженных воздействию внешних нагрузок.

Этими нагрузками для подводной трубы могут быть:

- падение давления;
- почвенный покров в траншее.

Понижение давления может быть вызвано несколькими способами:

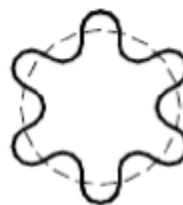
- трение и единичные потери во впускном трубопроводе;
- резкие перепады давления;
- недостаточное давление при погружении труб;
- внешнее давление воды на трубу наполненную воздухом.

Потеря устойчивости происходит тогда, когда силы сжатия в радиальном направлении превышают устойчивость материала трубы.

На рисунке 2.3.2 схематически показаны потери устойчивости трубы.

Плотный
грунтРыхлый грунт
вода или воздух

Рисунок 2.3.2 – Различные типы потери устойчивости

 $n > 2$  $n > 2$

Устойчивость труб продольному изгибу значительно различается в зависимости от установки: в траншее или на дне (открыто).

2.3.2.1 Потеря устойчивости незакрепленных труб

В случае относительно больших расстояний между бетонными пригрузами, трубу, при погружении или лежа на дне, можно рассматривать как безопорную.

Давление потери устойчивости для безопорной трубы может быть рассчитано по формуле:

$$P_{п.у.} = \frac{2 \cdot E}{1 - \nu^2} \cdot \left(\frac{s}{D_m} \right)^3 \cdot k \quad (2.3-15)$$

$P_{п.у.}$ – давление потери устойчивости (МПа);

E – модуль упругости (для длительной нагрузки применяется модуль ползучести, для резких перепадов давления применяется кратковременный модуль упругости);

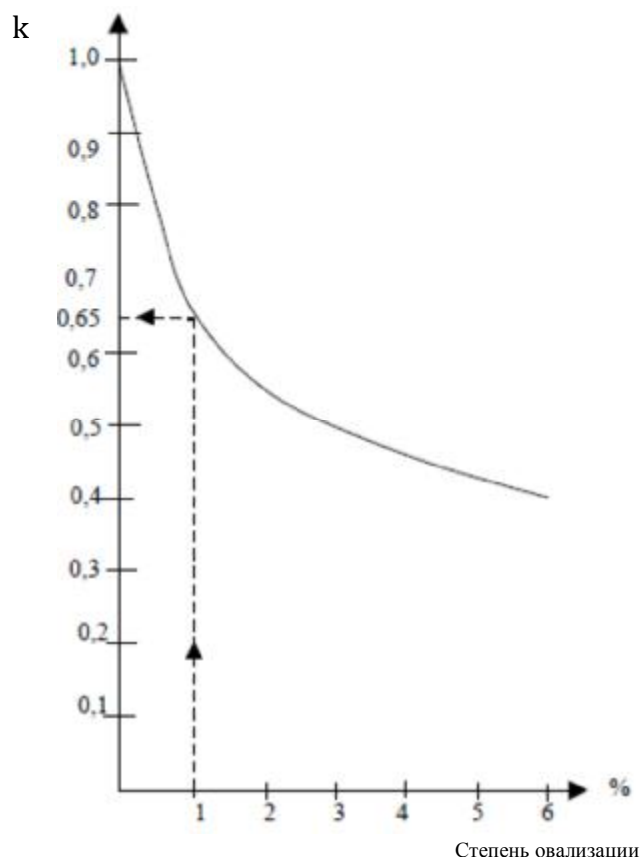
ν – коэффициент Пуассона (0,42-0,44);

s – толщина стенки (м);

D_m – средний диаметр (м);

k – поправочный коэффициент в связи с овализацией, из рисунка 2.3.2.1.

Рисунок 2.3.2.1 – Поправочный коэффициент в связи с овализацией



Формула (2.3-15) может быть преобразована путем введения соотношения SDR ($SDR = \frac{D}{s}$):

$$P_{п.у.} = \frac{2 \cdot E}{1 - \nu^2} \cdot \frac{k}{(SDR - 1)^3} \quad (2.3-16)$$

Из рисунка 2.3.2.1 понятно, что овализация установленной трубы имеет большое значение в отношении способности противостоять продольному изгибу. Для стандартных труб овализация соответствующая 1-1,5%, является приемлемой. Это дает понижающий коэффициент $k = 0,65$.

Против потери устойчивости в подводных трубопроводах, подверженных разрежению, могут работать бетонные пригрузы, при условии, что расстояние между ними достаточно мало. Следовательно, устойчивость увеличится.

Если расстояние l между опорами (пригрузы или кольца) находится в диапазоне:

$$4 \cdot \sqrt{\frac{s \cdot D_m}{2}} < l \leq \frac{1,56 \cdot s}{(s/D_m)^{0,5}}, \quad (2.3-17)$$

давление потери устойчивости может быть записано:

$$P_y = \frac{2,2 \cdot s \cdot \sqrt{E}}{l} \cdot \sqrt{P_{п.у.}} \cdot \frac{k}{F} \quad (2.3-18)$$

l — длина между опорами (расстояние между центрами);

$P_{п.у.}$ — давление потери устойчивости для безопорной трубы (см. формулу (2.3-16)), $k=1,0$;

s – толщина стенок;

k – понижающий коэффициент в связи с овализацией, см. рисунок 2.3.2.1;

F – коэффициент безопасности (2,0).

2.3.2.2 Потеря устойчивости труб в траншее/под давлением грунта

У трубы, установленной в траншею, величина, противостоящая продольному изгибу, значительно больше, чем у безпорных труб. Наиболее важными факторами являются:

- кольцевая жесткость трубы;
- модуль упругости для почвы (тангенциальный модуль).

Давление продольного изгиба q может быть определено по формуле (2.3-19) [8]:

$$q = \frac{5.63}{F} \cdot \sqrt{S_R \cdot E_t^1 \cdot \alpha} \quad (2.3-19)$$

$$\alpha = 1 - 3 \cdot \frac{\delta}{D} \quad (2.3-20)$$

S_R – кратковременная кольцевая жесткость;

$$S_R = \frac{E}{12 \cdot (SDR-1)^3} \quad (2.3-21)$$

$E_t^1 = 2E_s^1$ – тангенциальный модуль грунта;

E_s^1 – секущий модуль грунта (см. рисунок 2.3.2.2);

$\frac{\delta}{D}$ – овализация ($\approx 0,05$);

F – коэффициент безопасности (не должен быть менее 2,0).

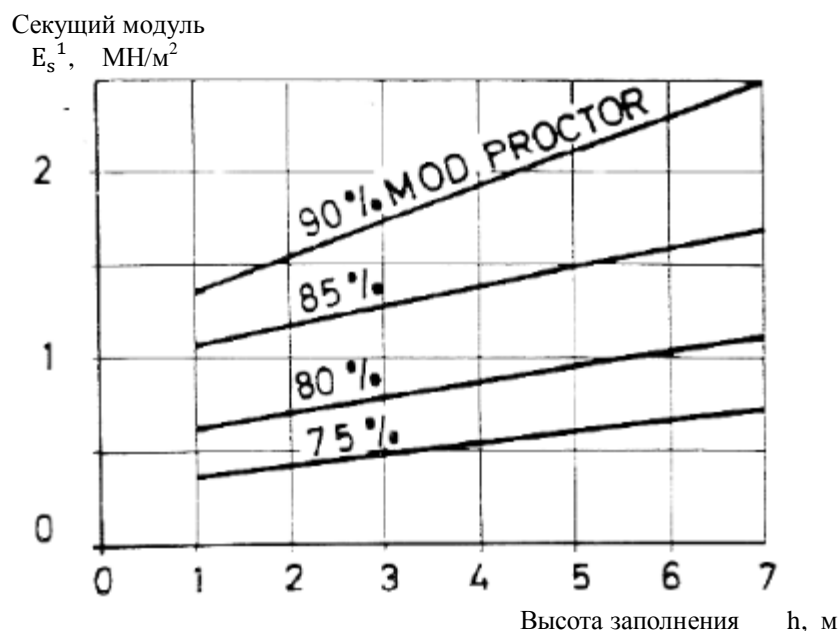


Рисунок 2.3.2.2 – Секущий модуль для грунта по отношению к высоте заполнения подводной траншеи

Для трубы, установленной в траншею, к разрежению, вызванному гидравлическим потоком, следует добавлять давление, вызванное почвенным покровом.

Давление грунта q_s вокруг трубы считается равномерно распределенным по периметру.

$$q_s = (\gamma - \gamma_w) \cdot h \quad (2.3-22)$$

γ – удельный вес почвы;

γ_w – удельный вес воды;

h – высота почвенного покрова.

2.3.3 Гидроудар

Гидравлический удар (скачок давления) происходит в трубопроводе, когда происходит внезапное изменение в потоке. Результатом является волна давления, распространяющаяся по системе. Самой распространенной причиной скачка давления является внезапный запуск и остановка насосов или закрытие/открытие клапанов. Даже если на насосы установлен частотный конвертер, то может подвести подача электроэнергии. Точные расчеты гидроударов сложны и должны проводиться в компьютерных программах.

Однако есть упрощенный метод, который дает представление о максимальной и минимальной амплитуде волны давления. Этот метод представлен ниже.

Для впускного и водоотводящего трубопроводов гидроудар, как правило, не является проблемой, если трубы не связаны непосредственно с насосом, но внезапного закрытия клапанов следует избегать.

Изменения потока будут затухать во впускной и водоотводящей камере.

Площадь камеры должна быть рассчитана с учетом ожидаемых изменений в потоке.

В таких случаях амплитуда колебаний будет находиться в пределах ± 1 метр выше максимального и ниже минимального уровня рабочей высоты соответственно.

Для транзитных трубопроводов и впускных с водоотводящими трубопроводами подключенных непосредственно к насосам, гидроудар может привести к повреждению трубы в случае слишком низкого значения давления.

Как правило, наиболее критическое разрежение, которое может достигать значений более 1 атмосферы, возникает при условии, что есть точки, которые расположены значительно выше в трассе.

Чтобы уменьшить рост давления, насос можно соединить с емкостями, рассчитанными на высокое давление.

Такие решения чаще всего экономически выгодны по сравнению с уменьшением соотношения SDR для труб, однако зависят от длины трубопровода и диаметра.

Также следует отметить, что рост давления может произойти во время погружения полиэтиленовых труб [12].

Величина гидроудара вытекает из общего отношения от перенапряжения

$$\Delta p = \frac{\Delta V \cdot c}{g} \quad (2.3-23)$$

Рост давления (гидроудар) линейно зависит от скорости волны давления в воде внутри трубы. ΔV является изменением скорости течения воды (ускорение/замедление) и $g = 9,81$ м/с². Скорость распространения ударной волны в трубопроводе определяется по формуле:

$$c = \sqrt{\frac{E_0}{(1-\nu^2) \cdot \rho}} \cdot \left[\frac{s}{D_m} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.3-24)$$

E_0 – кратковременный модуль упругости, из таблицы 2.1.2;

$\nu = 0,42 - 0,44$ – коэффициент Пуассона;

ρ – плотность воды;

s – толщина стенки;

$$D_m = D_0 - e$$

Получим уравнение для c в виде зависимости от класса SDR трубы:

$$c = \sqrt{\frac{E_0}{(1-\nu^2) \cdot \rho}} \cdot \frac{1}{(SDR-1)^{\frac{1}{2}}} \quad (2.3-25)$$

Скачком является краткое условное время (несколько секунд), согласно которому полиэтиленовые трубы, нагруженные постоянным долгосрочным напряжением, возвращается к своему первоначальному модулю E в нулевой момент времени.

В таблице 2.3.3 приведена скорость распространения ударной волны для материалов ПЭ100 и ПЭ80 в зависимости от класса SDR.

Таблица 2.3.3 – Скорость волны давления для полиэтилена

Полиэтиленовая труба	Скорость волны давления в воде внутри ПЭ-трубы, с, м/сек		
	SDR26	SDR17,6	SDR11
PE100 $E_0 = 1050 \text{ Н/мм}^2$	227	278	359
PE80 $E_0 = 800 \text{ Н/мм}^2$	198	243	313
	$\nu = 0,43$		

На практике ΔV в (2.3-23) может быть положительным или отрицательным:

- положительное – случается при закрытии клапана в конце линии или запуске насоса;
- отрицательное – вызвано отказом насоса или внезапным изменением гидравлических условий, которые уменьшают расход и скорость.

Если гидравлический удар регулярно повторяется в течение всего срока службы трубы, то он может привести к разрушению, вызванному усталостью материала.

Как показывает опыт, полиэтиленовая труба может выдержать 10^7 колебаний амплитудой с 50% превышением номинального давления, без сокращения своего срока службы. Недостаточное давление не приводит к усталости материала, только к овализации.

2.3.4 Температурные напряжения

Если труба подвержена изменениям температуры, то они будут влиять на её длину, при условии, что она никак не закреплена.

Изменение длины ΔL может быть выражено формулой:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T \quad (2.3-26)$$

α – коэффициент теплового расширения ($\approx 0,22 \cdot 10^{-3} \text{°C}^{-1}$);

L_0 – начальная длина при монтаже;

ΔT – изменение температуры.

Как видно, изменение длины не зависит от диаметра и толщины стенки.

При оценке длины трубы перед её установкой необходимо принимать во внимание изменения температуры.

Если предотвратить движение трубы, то в результате будет напряжение в стенке трубы. Бетонные пригрузы, анкерные блоки или засыпка в траншеях могут предотвратить перемещение трубы.

Если труба полностью зафиксирована, то напряжение σ_T может быть выражено:

$$\sigma_T = -E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (2.3-27)$$

E – модуль упругости (МПа).

Положительное значение рассматривается как растягивающее напряжение. Как видно из (2.3-27), напряжение не зависит от длины трубы и диаметра. Напряжение будет уменьшаться со временем, как и модуль упругости - за счет релаксации полиэтилена.

Напряжения, действующие в продольном направлении трубы должны быть добавлены/вычтены к другим напряжениям, которые вызваны внутренним давлением, гидроударом или почвенным покровом.

До сих пор было рассмотрено равномерное изменение температуры по всей трубе.

Другая ситуация характеризуется как разница температур в стенке трубы.

Температура воды внутри трубы и вне ее может быть различной.

В этом случае могут возникать как дополнительное сжимающее, так и дополнительное растягивающее напряжение.

Напряжения будут в радиальном направлении.

Максимальное напряжение может быть вычислено по формуле (2.3-28):

$$\sigma_T = \frac{E \cdot \alpha \cdot (T_{\text{внеш}} - T_{\text{внут}})}{2} \quad (2.3-28)$$

Отрицательный знак означает напряжение сжатия, в то время как положительный указывает на растягивающее напряжение.

Данные напряжения из-за релаксации со временем уменьшаются.

2.3.5 Напряжения при изгибе

Полиэтиленовые трубы, благодаря своей гибкости, могут быть согнуты с определенной кривизной. Однако, есть минимальный радиус, который не может быть превышен, чтобы избежать потери устойчивости (перегиба трубы).

Во время такого изгиба будут происходить напряжения и деформации, как в продольном, так и радиальном направлении трубопровода.

Необходимо удостовериться в том, что радиус изгиба больше критического радиуса изгиба. Особенно во время погружения дюкера.

Во время установления баланса сил (вес бетонных блоков, сил от лодок, силы плавучести, силы течения и волн или других искусственных сил) определяется конфигурация и максимальная кривизна.

Если труба изогнута с кривизной радиусом R в осевом направлении, то будет происходить деформация в стенке трубы ε_a . Эта деформация может быть выражена:

$$\varepsilon_a = \frac{r}{R} = \frac{D}{2 \cdot R} \quad (2.3-29)$$

r – радиус трубы;

R – радиус изгиба;

D – внешний диаметр трубы.

Эта ситуация отображена на рисунке 2.3.5.

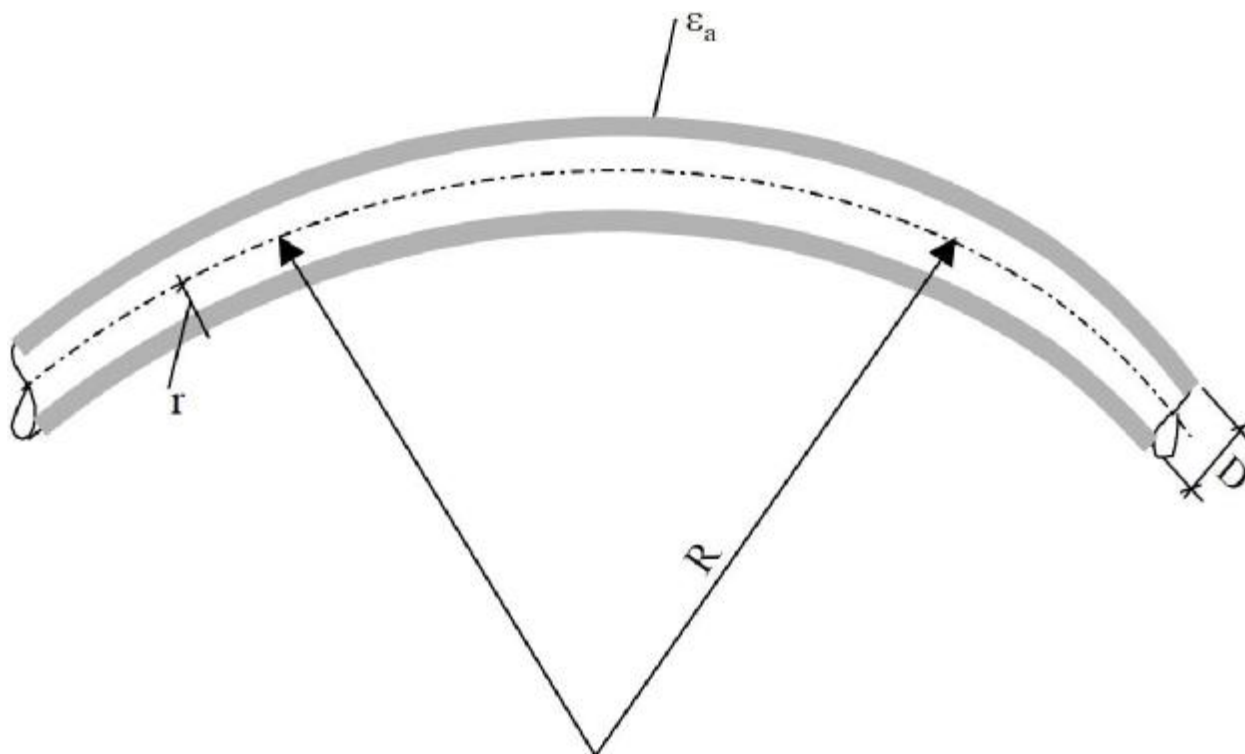


Рисунок 2.3.5 – Полиэтиленовая труба при чистом изгибе

Изгиб трубы до радиуса R должен происходить при условии, что внешний момент вызван силами упомянутыми ранее. Момент M может быть выражен:

$$M = \frac{E \cdot I}{R} \quad (2.3-30)$$

E – модуль упругости.

$$I = \frac{\pi}{64} \cdot (D^4 - d^4) \quad (\text{момент инерции}) \quad (2.3-31)$$

D – внешний диаметр;

d – внутренний диаметр.

Максимальное напряжение в стенке трубы может быть оценено по закону Гука (см.2.3-14):

$$\sigma_a = E \cdot \varepsilon_a = E \cdot \frac{r}{R} = E \cdot \frac{D}{2 \cdot R} \quad (2.3-32)$$

Напряжением является растяжение во внешней кривой и сжатие во внутренней кривой. Из-за релаксации величина напряжения со временем будет уменьшаться.

Часто вводится коэффициент $\frac{R}{D} = a$

Формулы (2.3-29) и (2.3-32) можно преобразовать:

$$\varepsilon_a = \frac{1}{2 \cdot a} \quad (2.3-33)$$

$$\sigma_a = \frac{E}{2 \cdot a} \quad (2.3-34)$$

Примечательно, что напряжение и деформация в продольном направлении не зависят от класса SDR трубы.

Когда труба в течение всего срока службы установлена с изгибом, эти напряжения могут способствовать сокращению величины допустимого давления.

Обычно, в ситуациях с комбинированными нагрузками такими как: давление, температурные нагрузки, волны и т.д., рекомендуется:

$$R_{\min} = 60 \cdot D.$$

Как упоминалось ранее, релаксация в полиэтилене будет снижать нагрузку в результате изгиба больше и быстрее чем уменьшение предела прочности материала. Следовательно, коэффициент безопасности будет увеличиваться с течением времени.

2.3.5.1 Потеря устойчивости труб при изгибе

Если труба постоянно подвергается изгибу, то рано или поздно это приведет к потере устойчивости. Теоретически есть два возможных случая:

- осевая потеря устойчивости;
- радиальная потеря устойчивости.

Для подводных трубопроводов, при значительном внутреннем давлении, радиальная потеря устойчивости будет иметь решающее значение [12].

Критическую деформацию для радиального продольного изгиба в состоянии чистого изгиба можно записать:

$$\varepsilon_{\text{crit,r}} = 0,28 \cdot \left(\frac{s}{D_m} \right) \quad (2.3-35)$$

Отношение между осевыми и радиальными деформациями определяется показателем Пуассона:

$$\varepsilon_r = \nu \cdot \varepsilon_a \quad (2.3-36)$$

Если принять $\nu = 0,43$ и подставить (2.3-36) в (2.3-35), то можно найти критические деформации в осевом направлении $\varepsilon_{\text{crit,a}}$:

$$\varepsilon_{\text{crit,a}} = \frac{0,28}{\nu} \cdot \left(\frac{s}{D_m} \right) = \frac{0,65}{\text{SDR}-1} \quad (2.3-37)$$

$$\text{SDR} = \frac{D}{s};$$

D_m – средний диаметр;

s – толщина стенки.

Если объединить (2.3-37) и (2.3-33), то можно определить отношение критического изгиба полиэтиленовой трубы в осевом направлении:

$$a_{\text{crit}} = \frac{\text{SDR}-1}{1,3} = 0,77(\text{SDR} - 1) \quad (2.3-38)$$

Обычно для таких расчетов вводят коэффициент запаса прочности $F = 1,5$.

Поэтому отношение допустимого изгиба: $a_{\text{допустимое}, F=1,5} = \frac{R}{D} = 1,2 \cdot (\text{SDR} - 1)$ (2.3-39)

Используя это отношение можно составить таблицу отображающую отношение допустимого изгиба (R/D) для классов SDR 33, 26, 22, 17, 11 и 9, принимая коэффициент безопасности равным 1,5.

Таблица 2.3.5.1 – Отношение допустимого изгиба во время погружения

Класс SDR	Отношение допустимого изгиба $\frac{R}{D}$ при $F = 1,5$
33	39
26	30
21	24
17	20
13	15
11	12
9	11

Если труба подвергается внутреннему давлению при изгибе, то овализация будет снижена, и критическая деформация будет увеличиваться.

Рисунок 2.3.5.1 показывает влияние на трубы с внутренним давлением в 1 бар для классов SDR 26, 17,6 и 11.

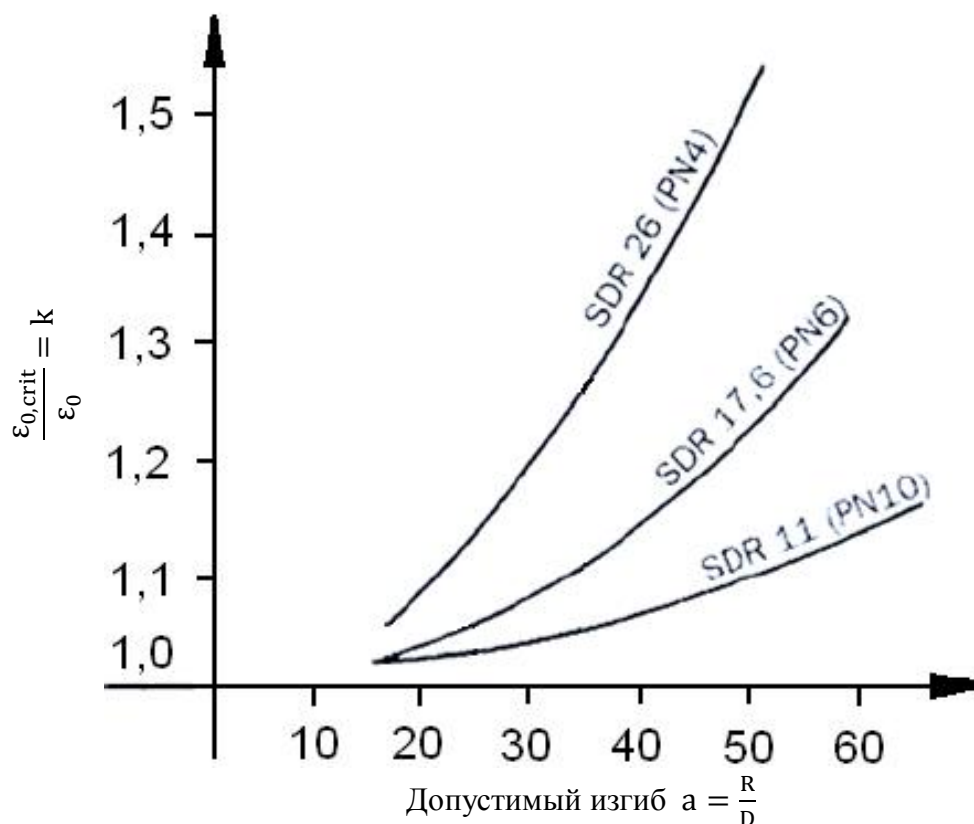


Рисунок 2.3.5.1 – Увеличение допустимой деформации при внутреннем давлении в 1 бар

Рисунок 2.3.5.1 указывает, что внутреннее давление оказывает значительное стабилизирующее влияние на класс SDR26 (21%).

Для полиэтиленовых труб классом SDR11 или ниже, стабилизирующее влияние внутреннего давления незначительно.

Для труб с низким давлением (\leq PN4) внутреннее давление увеличивает коэффициент безопасности в отношении потери устойчивости.

2.3.6 Дополнительные напряжения

В предыдущих главах обсуждались напряжения, вызванные:

- внутренним давлением;
- внешним давлением (вода и грунт);
- гидравлическим ударом;
- изменениями температуры;
- изгибом.

Но на подводные трубопроводы могут также оказывать влияние и другие факторы:

- концентрированная нагрузка, где труба лежит - на горной породе или камне;
- вес «подвешенного» трубопровода;
- силы течения;
- силы от воздействия волн.

2.3.6.1 Силы течения и воздействия волн

Силы течения и силы от воздействия волн рассмотрены в соответствии с конструкцией бетонных пригрузов, а именно – сила сопротивления и подъемная сила. Для трубопровода, стабильно лежащего на дне, силы можно считать равномерно распределенными по длине секций трубы между опорами (бетонными пригрузами), но ограниченными длиной гребня волны.

Величина этих сил может быть примерно описана по следующей формуле:

$$f = C \cdot D \cdot \rho \cdot \frac{V^2}{2} \quad (2.3-40)$$

f – величина силы на метр трубы;

C – поправочный коэффициент;

D – внешний диаметр;

ρ – плотность окружающей воды;

V – скорость окружающей воды, вертикально по отношению к оси трубы.

Для сил от воздействия волны также следует учитывать силы инерции, особенно для больших диаметров (см. раздел 2.4.6).

Когда известна величина действующей равномерно распределенной нагрузки на единицу длины трубы, напряжение можно вычислить по известным формулам из статического проектирования балок. Если, например, выбрать случай закрепленной балки, то получаем:

$$\sigma_{\max} = \frac{4 \cdot f \cdot l^2 \cdot D}{3 \cdot \pi \cdot (D^4 - d^4)} \quad (2.3-41)$$

f – величина силы на единицу длины;

l – расстояние между опорами;

D – внешний диаметр;

d – внутренний диаметр.

2.3.6.2 Подвешенное состояние трубопровода

Ситуация с подвешенным состоянием трубопровода очень похожа на равномерно распределенную нагрузку от сил течения и воздействия волн. Однако в этом случае возникает дополнительный компонент силы от бетонного пригруза между опорами по всей длине l . Это означает, что напряжения в стенке трубы возрастут. Такие ситуации могут возникать из-за грубого рельефа дна.

2.3.6.3 Сосредоточенные нагрузки

Там, где трубопровод лежит на горной породе, возникают дополнительные напряжения. Главным образом величина напряжения зависит от:

- числа бетонных пригрузов, висящих на обеих сторонах от места воздействия;
- площади места воздействия.

Существует вариант исключения всех сосредоточенных нагрузок путём подкладывания дополнительного защитного материала между трубой и горной породой.

Величина напряжения, вызванного сосредоточенной нагрузкой, может быть примерно оценена по формуле:

$$\sigma_{\text{кон}} = \frac{3 \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot s^2} \quad (2.3-42)$$

P – общая сосредоточенная нагрузка;

s – толщина стенки.

Как правило, рекомендуется всё же избегать контакта с камнями. Во многих случаях, однако, такая идеальная ситуация невозможна без чрезмерных затрат.

2.3.7 Комбинированные нагрузки

В главе 2.3 рассмотрены различные виды сил, которые могут действовать на эксплуатацию дюкеров.

Эти силы создают напряжения и деформации в стенке трубы.

Некоторые напряжения сжимающие, а некоторые из них растягивающие. Некоторые из них действуют в осевом направлении, а некоторые из них действуют в радиальном направлении. В некоторых ситуациях это также могут быть касательные напряжения (напряжения сдвига), но они не будут рассматриваться в данных рекомендациях.

Для подводных трубопроводов касательные напряжения (напряжения сдвига) не будут иметь решающего значения.

Когда подсчитаны все фактические напряжения (см. 2.3-1–2.3-6), то их следует суммировать в радиальном и в осевом направлениях.

Растягивающие напряжения являются положительными, а сжимающие напряжения отрицательными.

$$\sigma_p = \sum_{i=1}^n \sigma_{i,p} \quad (2.3-43)$$

$$\sigma_o = \sum_{i=1}^n \sigma_{i,o} \quad (2.3-44)$$

σ_p – общее напряжение в радиальном направлении;

$\sigma_{i,p}$ – i -е напряжение в радиальном направлении;

σ_o – общее напряжение в осевом направлении;

$\sigma_{i,o}$ – i -е напряжение в осевом направлении.

Чтобы найти эквивалентное напряжение $\sigma_{\text{эКВ}}$, часто используется критерий фон Мизеса:

$$\sigma_{\text{эКВ}} = \sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_o^2 - \sigma_p \cdot \sigma_o} \quad (2.3-45)$$

Как показывает формула, сочетание сжимающего напряжения в одном направлении и растягивающего напряжения в другом, является более важным, чем только напряжения сжатия или растяжения в обоих направлениях.

Согласно выводам, изложенным в главах 2.1 и 2.3.1.2, полиэтилен склонен к релаксации, то есть изменению напряжения в стенке трубы и её деформация является функцией времени. Поэтому расчеты следует проводить с учетом краткосрочных и долговременных нагрузок.

2.4 Расчет нагрузки от бетонных пригрузов

Подводные трубопроводы из полиэтилена, если они не нагружены бетонными пригрузами, будут плавать за счет плавучести, так как удельный вес материала ПЭ меньше, чем окружающей воды. Целью пригрузов также является обеспечение стабильности в отношении:

- аккумуляции воздуха и газа (хотя этот вопрос желательно разрешать не при помощи пригрузов);
- силы течения;
- силы от воздействия волн.

2.4.1 Степень нагрузки

В зависимости от технических условий проекта, следует вычислить сумму нагрузки. Эта степень нагрузки часто связана с перемещением трубы:

$$a_d = \frac{w_{cw}}{\frac{D^2}{\pi \cdot \frac{1}{4}} \cdot \gamma_w} \cdot 100\% \quad (2.4-1)$$

w_{cw} – масса бетонных пригрузов в воде, распределенная на метр трубы;

D – внешний диаметр;

γ_w – удельный вес окружающей воды.

Другой способ описания степени нагрузки заключается в сравнении её с плавучестью внутреннего объема трубопровода. Это называется степенью заполнения воздухом, и зачастую используется, чтобы описать степень нагрузки:

$$a_a = \frac{w_{cw} + w_{pipe w}}{\frac{d^2}{\pi \cdot \frac{1}{4}} \cdot \gamma_w} \cdot 100\% \quad (2.4-2)$$

$w_{pipe w}$ – вес трубопровода в воде (отрицательный);

d – внутренний диаметр.

Степень заполнения воздухом говорит о том, на какую степень внутреннего объема труба должна быть заполнена воздухом, чтобы оставаться на плаву. Это определение также включает вес трубы.

Степень заполнения воздухом, равная например 30%, не означает, что ожидается 30% заполнение воздухом внутреннего объема во время эксплуатации, а просто является практическим способом описания степени нагрузки.

Различие между a_d и a_a не столь велико. Рисунок 2.4.1 показывает это различие при условиях, что:

$\rho_{ПЭ} = 950 \text{ кг/м}^3$ (плотность ПЭ);

$\rho_c = 2400 \text{ кг/м}^3$ (плотность бетона);

$\rho_{w,sea} = 1025 \text{ кг/м}^3$ (плотность морской воды);

$\rho_w = 1000 \text{ кг/м}^3$ (плотность пресной водой).

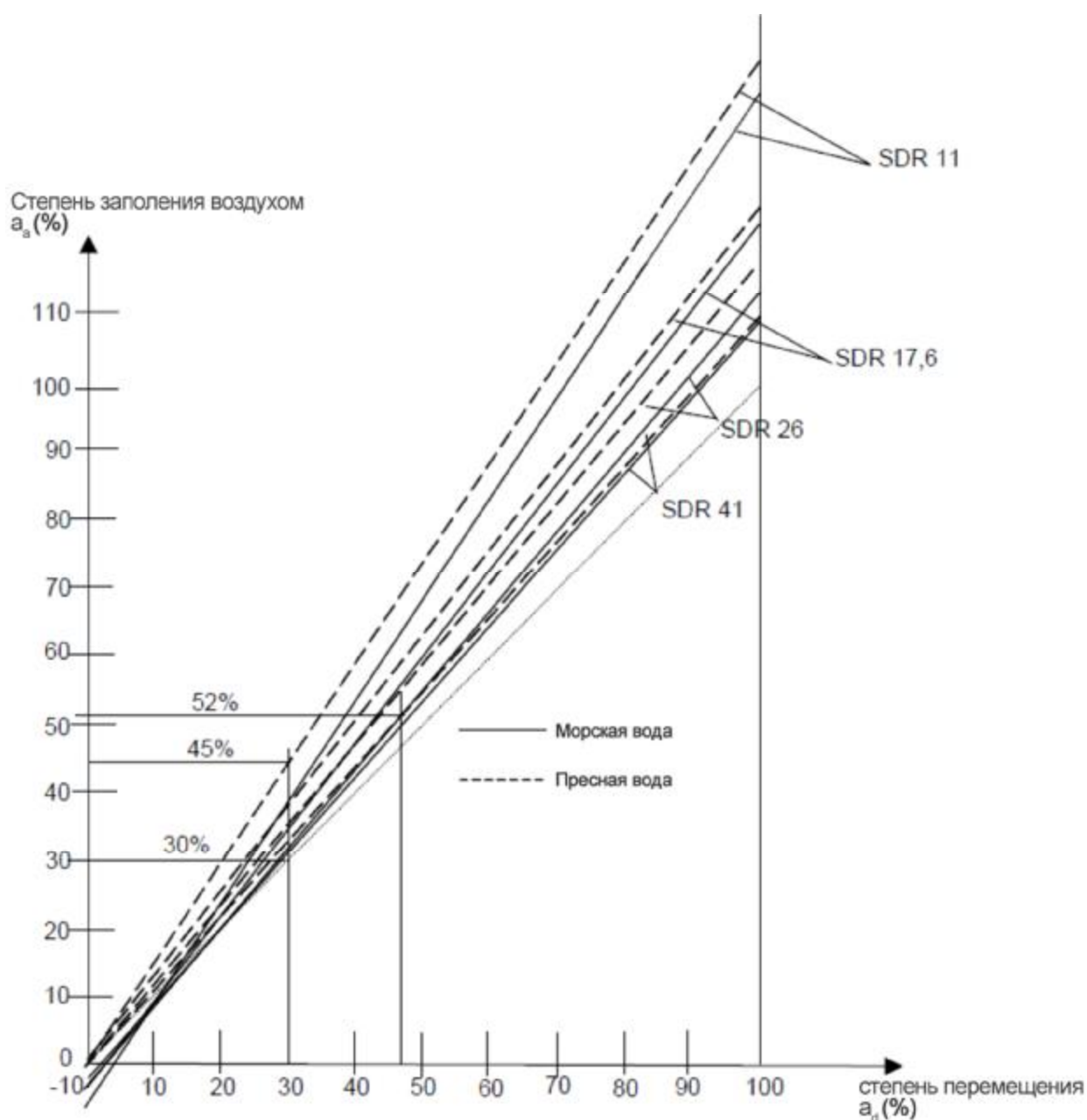


Рисунок 2.4.1 – Связь между степенью перемещения и степенью заполнения воздухом для бетонных пригрузов

Обычно речь идет о примерно 10-60% степени заполнения воздухом.

Если труба загружена в соответствии со степенью заполнения воздухом в 30%, то это означает, что 30% внутреннего объема трубы должно быть заполнено воздухом, для обеспечения равновесия в системе.

Зачастую бывает полезно знать соотношение между весом тела на воздухе и в воде.

Это может быть описано следующим образом:

$$\frac{w_w}{w_a} = \frac{\rho - \rho_w}{\rho} \quad (2.4-3)$$

w_w – вес в воде;

w_a – вес в воздухе;

ρ – плотность тела;

ρ_w – плотность воды.

2.4.2 Типы бетонных пригрузов

По форме различают 3 типа бетонных пригрузов:

- прямоугольные;
- круглые;
- звездообразные.

Типы бетонных пригрузов схематически отображены на рисунке 2.4.2.



Рисунок 2.4.2 – Различные виды бетонных пригрузов

Все пригрузки на трубе должны быть закреплены болтами. Должна обеспечиваться надлежащая фиксирующая сила, чтобы избежать скольжения или вращения при погружении на морском дне.

Как правило, сила сбалчивания должна превышать в 2-3 раза вес бетонных пригрузов на воздухе.

Между бетонным пригрузом и стенкой трубы должна быть резиновая лента, типа EPDM или наподобие. В большинстве случаев рекомендуются резиновые компенсаторы в болтовых соединениях, чтобы уменьшить местные напряжения в стенке трубы, вызванные внутренним давлением.

Очевидно, что пригрузки, показанные на рисунок 2.4.2, подвергаясь силе течения или воздействию волн имеют различное сцепление с морским дном.

Прямоугольный пригруз – это классическая форма. Она имеет общие хорошие рабочие характеристики и может быть использован в большинстве случаев.

Цилиндрическая форма пригруза используются в траншеях, в спокойной (пресной) воде и в местах, где имеет место рыболовство и постановка судов на якорь.

Звездообразный пригруз удобно применять в тех случаях, когда воздействие от волн и течений является значительным. Специальная форма обеспечивает повышенную стабильность.

Ниже приведены приближенные коэффициенты трения для 3 видов бетонных пригрузов:

Таблица 2.4.2 – Коэффициент трения для бетонных пригрузов

Тип	Коэффициент трения
Прямоугольные	0,5
Круглые	0,3
Звездообразные	0,8

2.4.3 Устойчивость полиэтиленового трубопровода на дне

В этом разделе приведена формула для проверки устойчивости подводных трубопроводов при условии накоплений воздуха/газа и внешних воздействий от течения и волн. Данная ситуация показана на рисунке 2.4.3.

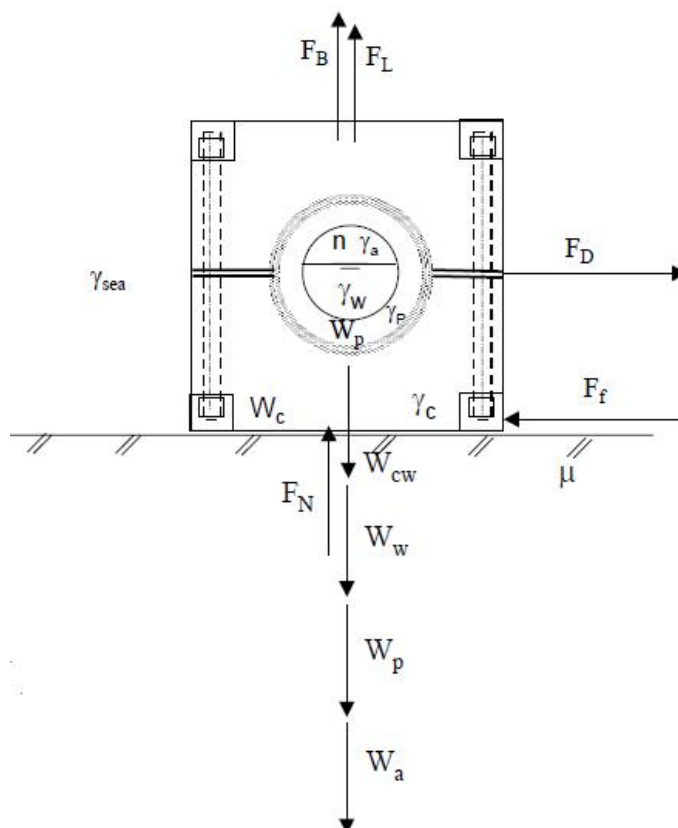


Рисунок 2.4.3 – Устойчивость полиэтиленовой трубы на дне

Считается, что силы течения и волн можно разложить на тяговое усилие в горизонтальном направлении F_D и подъемную силу в вертикальном направлении F_L одновременно действующие на трубопровод. Для того чтобы избежать скольжения, эти две силы должны быть преодолены весом системы и силой трения между бетонными пригрузами и морским дном.

Баланс сил в вертикальном направлении для метра трубы:

$$F_N = w_{cw} + w_w + w_p + w_a - F_B - F_L \quad (2.4-4)$$

F_N – вертикально направленная сила в отношении морского дна;

w_{cw} – нагрузка от бетонных пригрузов погруженных в воду на метр трубы;

w_w – нагрузка от воды внутри трубы на метр;

w_p – вес метра трубы на воздухе;

w_a – вес воздуха и газа внутри трубы на метр;

F_B – плавучесть трубы на метр;

F_L – подъемная сила.

Баланс сил в горизонтальном направлении дает: $F_f \geq F_D$ (2.4-5)

Так как $F_f = \mu \cdot F_N$ получаем критерий устойчивости: $\mu \geq \frac{F_D}{F_N}$ (2.4-6)

Коэффициент трения должен быть больше, чем отношение тянущего усилия к вертикально направленной силе.

Элементы в формуле (2.4-4) более точно могут быть выражены следующим образом:

$$w_{cw} = w_{ca} \cdot \frac{\gamma_c - \gamma_{sea}}{\gamma_c} \quad (2.4-7)$$

w_{cw} – нагрузка от бетонных пригрузов на воздухе на метр трубопровода;

γ_c – удельный вес бетона;

γ_{sea} – удельный вес морской воды.

$$w_w = (1 - \eta) \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \gamma_w \quad (2.4-8)$$

η – степень заполнения воздухом, например 30%, $\eta = 0,3$;

d – внутренний диаметр;

γ_w – удельный вес воды внутри трубы.

$$w_a = \eta \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \gamma_a \quad (2.4-9)$$

γ_a – удельный вес воздуха внутри трубы;

w_a в большинстве случаев можно пренебречь.

$$F_B = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \gamma_{sea} \quad (2.4-10)$$

D – внешний диаметр трубы.

В данном случае представлен полный набор формул, необходимый для проверки устойчивости трубопровода на дне, при условии, что тянущее усилие F_D и подъемная сила F_L известны. Для расчета F_D и F_L используйте главы 2.4.5 и 2.4.6.

2.4.4 Рекомендуемая степень заполнения воздухом для подводных трубопроводов

Как уже упоминалось ранее, нагрузка от бетонных пригрузов на подводные трубопроводы зависит от:

- I) плавучесть полиэтилена;
- II) скопления воздуха/газа;
- III) силы течения;
- IV) силы волн;
- V) рыболовные снасти.

I) Плавучесть полиэтиленового трубопровода зависит от диаметра и класса SDR но, как правило, находится в пределах 0,3-2,5%.

II) Количество воздуха/газа, которое будет накоплено в подводном трубопроводе, зависит от проекта и, как правило, должно быть рассчитано безошибочно.

Особенно для водоотводящих трубопроводов газовоздушные накопления могут быть существенной проблемой. Характер местности в зоне выбранной траектории имеет решающее значение.

Как правило, степень заполнения воздухом принимается согласно таблице 2.4.4:

Таблица 2.4.4 – Рекомендуемые "степени заполнения воздухом" для подводных трубопроводов касаясь газовоздушных накоплений

Тип трубопровода	Вид транспортировки		
	Самотёк	Насосом	Большие перепады высот
Питьевая вода	10%	15%	20%
Канализация	25%	30%	50%

III) Силы течения могут иметь важное значение для подводных трубопроводов устанавливаемых непосредственно на дно, особенно в реках.

Если силы слишком велики, трубопровод должен быть проложен в траншее.

Расчеты на устойчивость (см. 2.4.3) должны быть проведены для каждого проекта.

Как правило, в реках, трубопроводы должны быть проложены в траншее, особенно при пересечении потока. В морях и озерах, для получения стабильности зачастую будет достаточно увеличения степени заполнения воздухом примерно на 10%. Это дополнение следует добавлять к значениям I) и II).

IV) Силы волны должны рассчитываться отдельно. Как правило, трубопровод следует прокладывать на такой глубине, на которой влияние волн сводится к минимуму. Обычно, на открытом пространстве эта глубина составляет 10-15 м.

В дальнейшем рекомендуется общая степень заполнения воздухом в пределах 70-30% в зависимости от характеристик проектов.

Эта нагрузка сохраняется на глубине, соответствующей половине длины волны от расчетной (запроектированной) волны.

На больших глубинах применяются общие правила, приведенные в I), II) и III).

Незначительное перемещение трубопровода в то время, когда его пересекают волны на дне приемлемо.

Труба будет двигаться в пределах ограниченной территории, если степень заполнения воздухом рассчитана правильно. В таких случаях всегда применяются звездообразные пригрузки. Актуальны перемещения трубы как вращательные, так и скольжение. Для таких расчетов должны быть использованы более точные расчеты.

V) Учитывать влияние от рыболовных снастей, таких как сети и тралы, в расчете степени заполнения воздухом необязательно.

Тем не менее, бетонные пригрузки должны быть защищены от ситуации зацепления снастями трубопровода. В этих случаях применяются круглые пригрузки.

Подводя итог, можно сказать, что степень нагрузки на полиэтиленовый дюкер будет соответствовать степени заполнения воздухом в диапазоне: 15-60%.

В некоторых случаях это может быть экономически выгодно, для защиты трубопровода от пониженного давления (см. 2.3.2.1) сокращать расстояния между бетонными пригрузками. Степень заполнения воздухом в таких случаях будет выше, чем указывалось ранее.

2.4.5 Силы течения

Когда течение будет пересекать трубопровод, он будет подвергаться воздействию силы течения. Силу течения можно разложить на два элемента, тянущая сила F_D и подъемную силу F_L , смотрите рисунок 2.4.5.1.

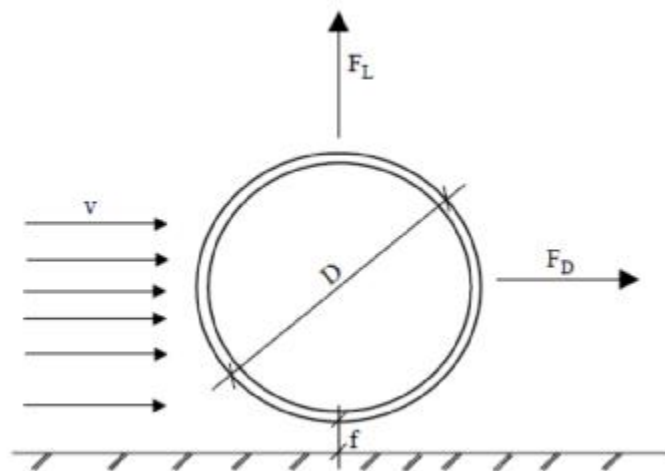


Рисунок 2.4.5.1 – Силы течения, действующие на трубопровод

Величина сил в основном зависит от:

- текущей скорости (V);
- диаметра трубы (D);
- плотности текущей воды (ρ);
- расстояния от трубы до дна (f).

Математически силы могут быть выражены следующим образом:

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot D \quad (2.4-11)$$

$$F_L = C_L \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot D \quad (2.4-12)$$

C_D – коэффициент лобового сопротивления;

C_L – коэффициент подъемной силы;

ρ – плотность текущей воды (кг/м^3);

V – скорость течения (м/с);

D – внешний диаметр трубы (м);

F_D – тянущая сила (Н/м);

F_L – подъемная сила (Н/м).

Коэффициенты F_D и F_L , зависят от числа Рейнольдса и шероховатости дна.

Число Рейнольдса (см. 2.2.1) может быть выражено:

$$R_e = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (2.4-13)$$

ν = вязкость воды $\approx 1,3 \cdot 10^{-6}$ ($\text{м}^2/\text{с}$)

Коэффициенты, как правило, колеблются в диапазоне 0,5-1,2. Значения для прокладки трубопровода на дне могут быть взяты из рисунков 2.4.5.2 и 2.4.5.3.

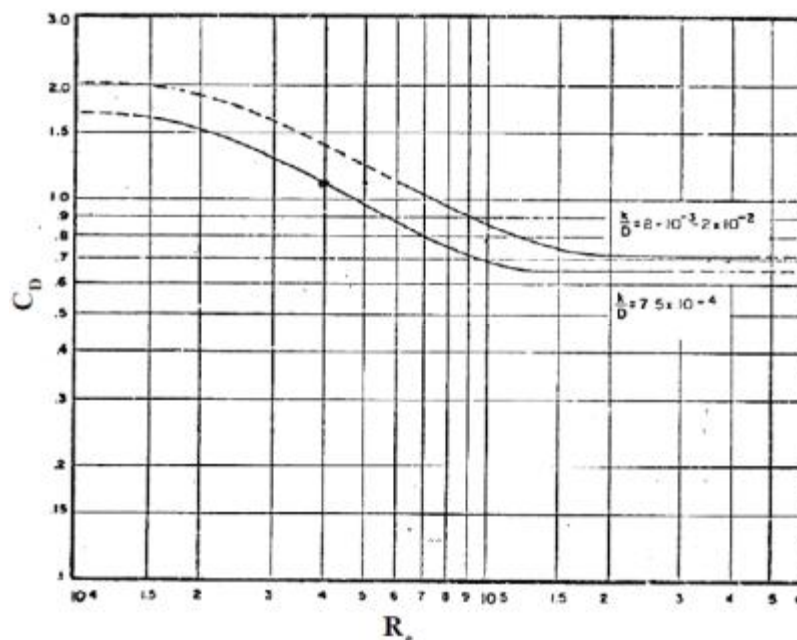
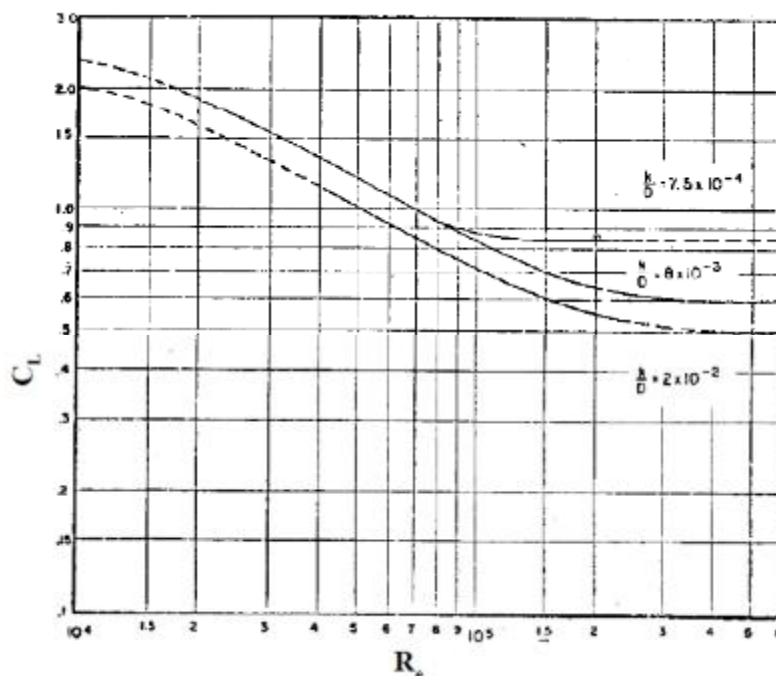


Рисунок 2.4.5.2 – Коэффициент сопротивления, C_D

Рисунок 2.4.5.3 – Коэффициент подъемной силы, C_L

Подъемная сила будет уменьшаться по мере того, как расстояние f между трубой и дном водоёма будет увеличиваться. Если $f = 0,5 \cdot D$, то подъемная сила будет около 10% от подъемной силы трубопровода проложенного непосредственно на дне водоёма. Это является одной из важнейших деталей в расчёте бетонных пригрузов.

Скорость, направленная перпендикулярно к трубопроводу может быть записана:

$$V_N = V \cdot \sin \alpha \quad (2.4-14)$$

Подставляя это выражение в (2.4-11) и (2.4-12):

$$F_C = C_C \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot \sin^2 \alpha \cdot D \quad (2.4-15)$$

$$F_L = C_L \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot \sin^2 \alpha \cdot D \quad (2.4-16)$$

2.4.6 Волновые нагрузки

Волны будут создавать большие воздействия на подводные трубопроводы, установленные непосредственно на дне.

Основными факторами являются:

- высота волны;
- периодичность волны;
- диаметр трубы;
- расстояние между трубой и дном;
- угол между трубопроводом и направлением движения волны;
- глубина;
- условия на дне водоёма.

Волны, приближающиеся к берегу, будут зависеть от условий на дне и рано или поздно они достигнут глубины, где впоследствии будут затухать.

Затухание волны образует большое количество энергии, что в конечном итоге может привести к повреждению структуры трубы.

В этом плане трубопровод следует погружать на глубину, равную или более, той глубине, на которой расчётная волна затухает.

Описание волн и сил волн предполагает сложный базис формул.

Есть несколько теорий, но общей чертой является разделение компонентов сил на 3 элемента:

- тянущую силу;
- подъемную силу;
- инерционную силу.

Движение частиц воды в волне проходит по круговой или эллиптической траектории, как показано на рисунке 2.4.6.1.

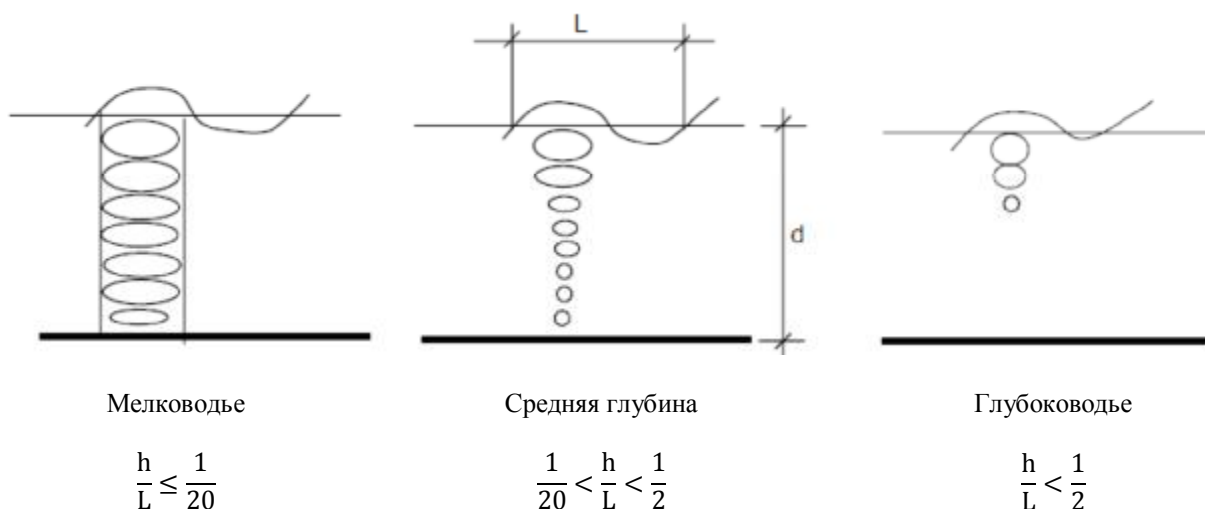


Рисунок 2.4.6.1 – Движение частиц волны

Как показано на рисунке 2.4.6.1, траектории частиц на глубине круговые. Глубина настолько велика, что перемещения волн не воздействуют на дно.

Глубоководность характеризуется глубиной (h) большей, чем половина длины волны ($h > \frac{L}{2}$).

Силы волны никогда не будут влиять на трубопровод, установленный на глубоководье.

На средней глубине ($\frac{L}{20} < h < \frac{L}{2}$) силы могут быть значительными, особенно в тот момент, когда они достигают крайних значений, аналогичных мелководью ($h > \frac{L}{20}$).

Поскольку частицы волны движутся во времени постоянно, то и силы волны будут меняться как по величине, так и по направлению.

В определенный момент, силы, действующие в одном направлении, будут влиять на один участок трубопровода, а другой участок будет подвергаться силам, действующим в противоположном направлении.

Чтобы проверить стабильность трубы достаточно знать предельное значение сил. Они могут быть рассчитаны по следующим формулам:

$$F_i = \pi \cdot C_i \cdot f \cdot \gamma \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{H_0}{L_0} \quad (2.4-17)$$

$$F_D = C_D \cdot f^2 \cdot \gamma \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{H_0}{L_0} \cdot \frac{H_0}{D} \quad (2.4-18)$$

$$F_L = C_L \cdot f^2 \cdot \gamma \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{H_0}{L_0} \cdot \frac{H_0}{D} \quad (2.4-19)$$

F_i – сила инерции;

F_D – сила сопротивления;

F_L – подъемная сила;

f – коэффициент преломления волны;

C_i – коэффициент инерции;

C_D – коэффициент сопротивления;

C_L – коэффициент подъемной силы;

γ – удельный вес воды (Н/м³);

D – внешний диаметр трубы (м);

H_0 – высота волны на глубоководье (м) (расстояние по вертикали от нижней части волны до гребня волны);

L_0 – длина волны на глубоководье (м).

Существует угол относительного расположения между F_i , F_D и F_L , который указывает, что они никогда не происходят синхронно. Например, F_i воздействует в 90° от силы F_L .

Если волна ударяется о трубопровод под углом α , то силы должны быть скорректированы при помощи показателя $\sin \alpha$.

Как показывают формулы (2.4-17), (-18) и (-19), есть несколько значений, которые должны быть известны до расчета сил волны. Ниже приводятся наиболее важные факторы.

Коэффициенты силы

Коэффициенты C_i , C_c и C_L определяются экспериментально. Коэффициенты зависят от расстояния между трубопроводом и морским дном (см. рисунок 2.4.5.1).

Если есть проход для воды под трубопроводом, то коэффициенты будут снижены.

В таблице 2.4.6.1, приведены некоторые значения коэффициентов.

Таблица 2.4.6.1 – Коэффициенты сил для волн

Коэффициент	Расстояние до дна = 0	Расстояние до дна $\geq \frac{D}{4}$
C_i	3,3	2
C_D	1	0,7
C_L	2	0

Высота волны и длина волны

Если нет данных о высоте волн, то они могут быть найдены на основе статистических данных о ветре и "протяженности области образования волн" для ветра.

На диаграммах, отображенных на рисунках 2.4.6.2 и 2.4.6.3, приведены значения высоты волны $H_{1/3}$ и соответствующего периода волны. Для определения этих параметров необходимо знать скорость ветра и протяженность области образования волн.

В расчетах используется максимальная высота волны (H_0) на глубоководье, а именно:

$$H_0 = 1,8 \cdot H_{1/3} \quad (2.4-20)$$

Период волны для H_0 считается так же, как для $H_{1/3}$ и может быть взят непосредственно из рисунка 2.4.6.3.

$$T_0 = T_{1/3} \quad (2.4-21)$$

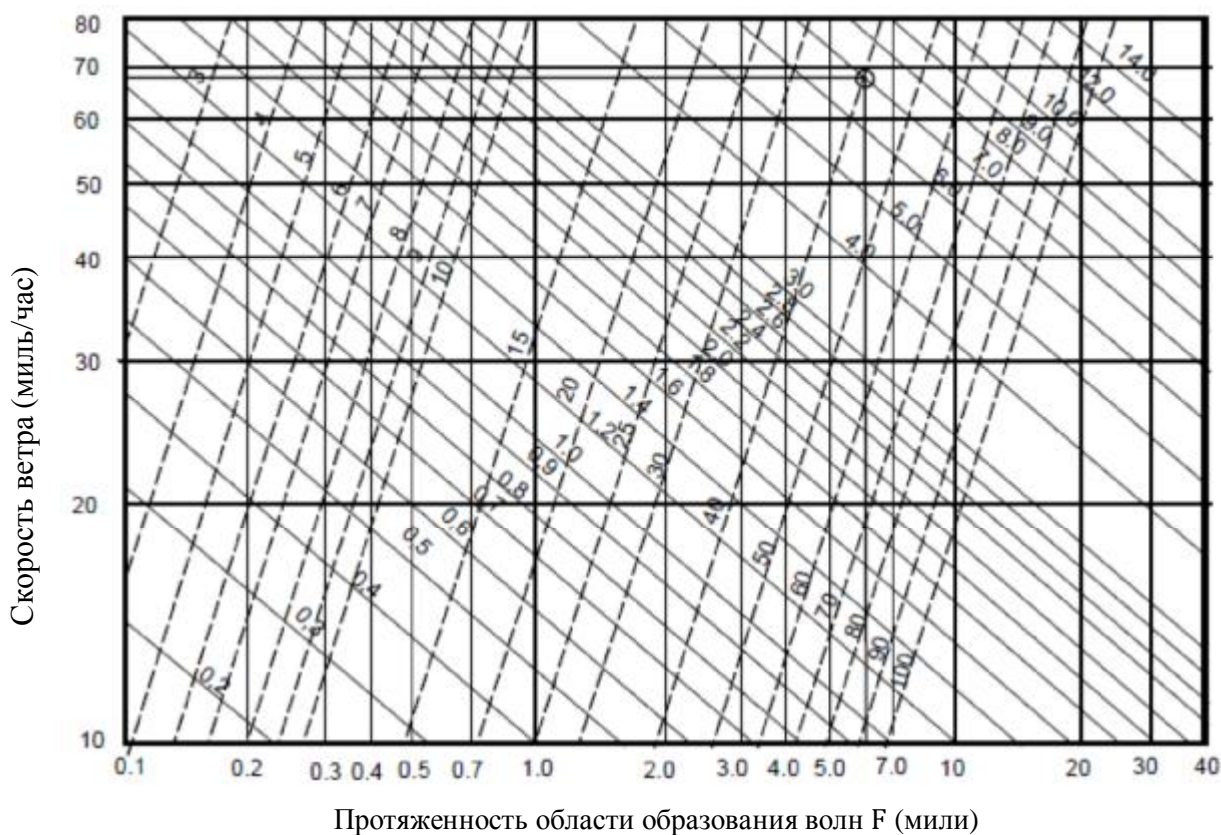


Рисунок 2.4.6.2 – Высота волны $H_{1/3}$ в зависимости от скорости ветра и "протяженности области образования волн"

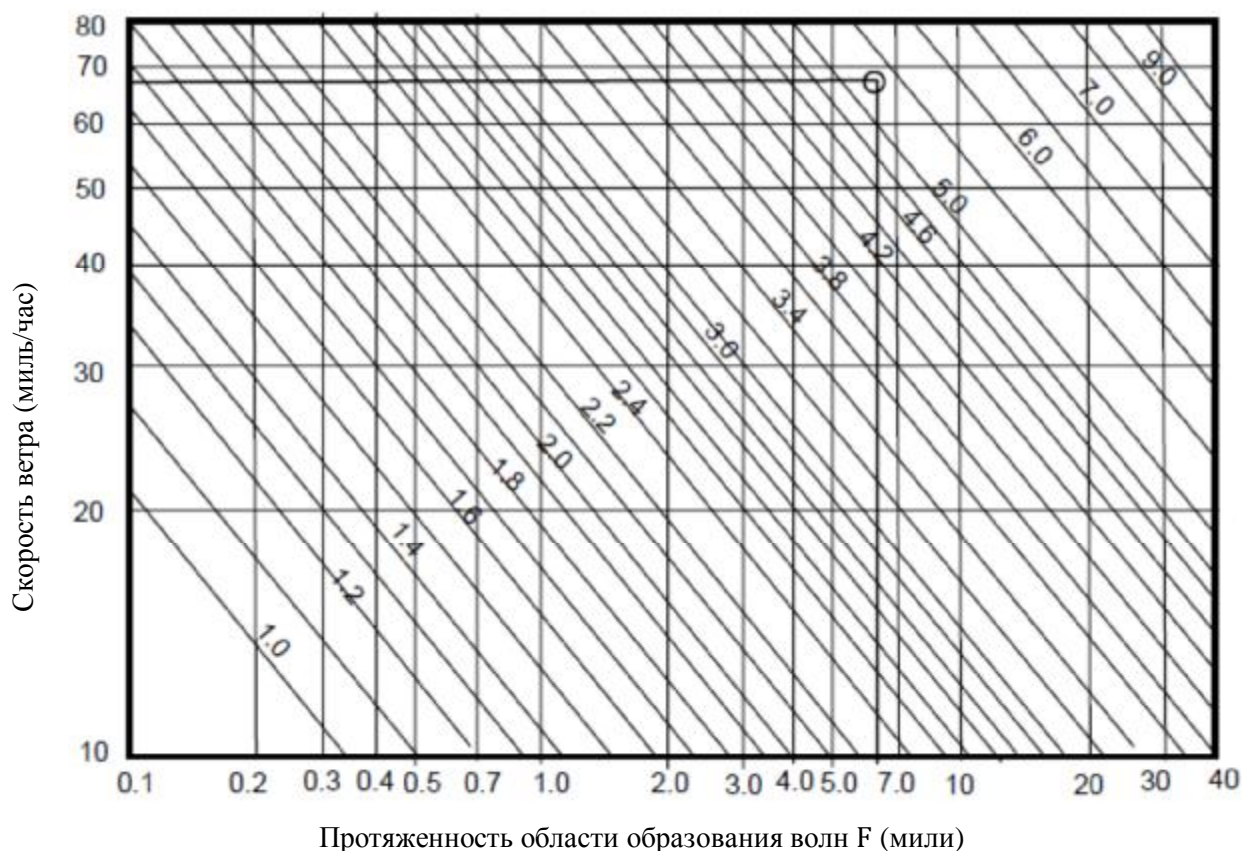


Рисунок 2.4.6.3 – Период волны как функция от скорости ветра и "протяженности области образования волн"

Следует обратить внимание, что высота волны, $H_{1/3}$, приводится в футах, в то время как скорость ветра в милях в час и "протяженность области образования волн" в милях (1 миля = 1609 м, 1 фут \approx 0,3 м)

Если статистической информации не имеется, можно применить следующие формулы для примерного расчета H_0 и L_0 [1].

$$H_0 = 0.045 \cdot u \cdot \sqrt{F} \quad (2.4-22)$$

$$L_0 = 0.56 \cdot u \cdot \sqrt{F} \quad (2.4-23)$$

u – скорость ветра (м/с);

F – протяженность области образования волн (км).

Это означает, что крутизна волны $\frac{H_0}{L_0}$ составляет около 8% (варьируется, как правило, в пределах 7-9%).

Формулы (2.4-22) и (2.4-23), как правило, дают немного завышенные значения и поэтому добавляют некий запас.

Но всё же рекомендуется использовать статистику волн, если она имеется в наличии.

Когда периодичность волн известна, то длина волны на глубоководье может быть рассчитана по формуле:

$$L_0 = 1.56 \cdot T_{1/3}^2 \quad (2.4-24)$$

Коэффициент преломления волны

Когда волны приближаются к берегу, с помощью этого фактора можно описать зависимость волн от условий дна водоёма.

Математически этот фактор может быть выражен:

$$f = \frac{2 \cdot a}{H_0} \cdot \sin \alpha \quad (2.4-25)$$

a – амплитуда частиц волны по круговой траектории на дне (см. рисунок 2.4.6.1);

α – угол между направлением скорости волны и трубопроводом.

Существуют диаграммы для коэффициента преломления волны, основанные на определённых условиях. Эти условия предполагают, что интервалы между горизонталями на дне являются прямыми линиями, параллельными береговой линии.

Входными значениями для диаграмм являются:

α_0 – угол между направлением скорости волны и перпендикуляром к берегу;

β – угол между трубопроводом и перпендикуляром к берегу.

Рисунки 2.4.6.4, 2.4.6.5 и 2.4.6.6 дают возможность найти значение для f [4].

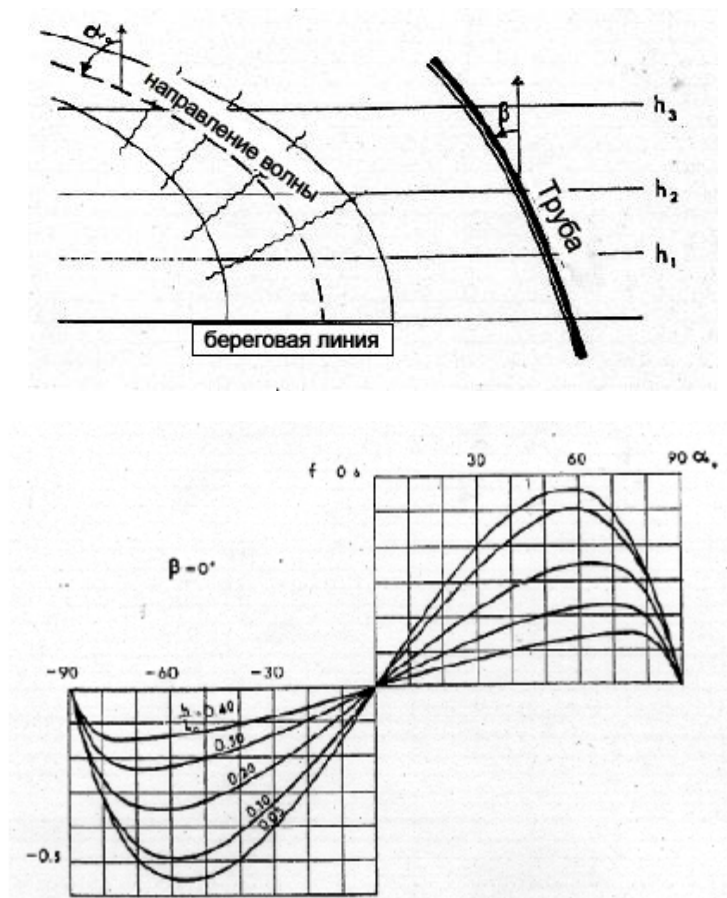
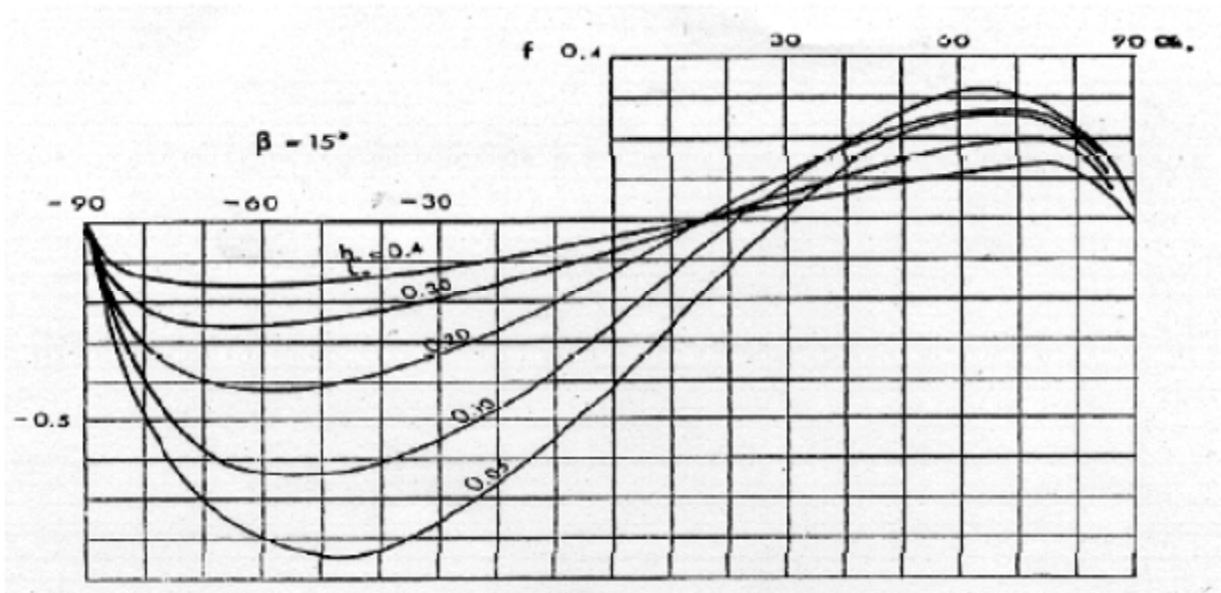
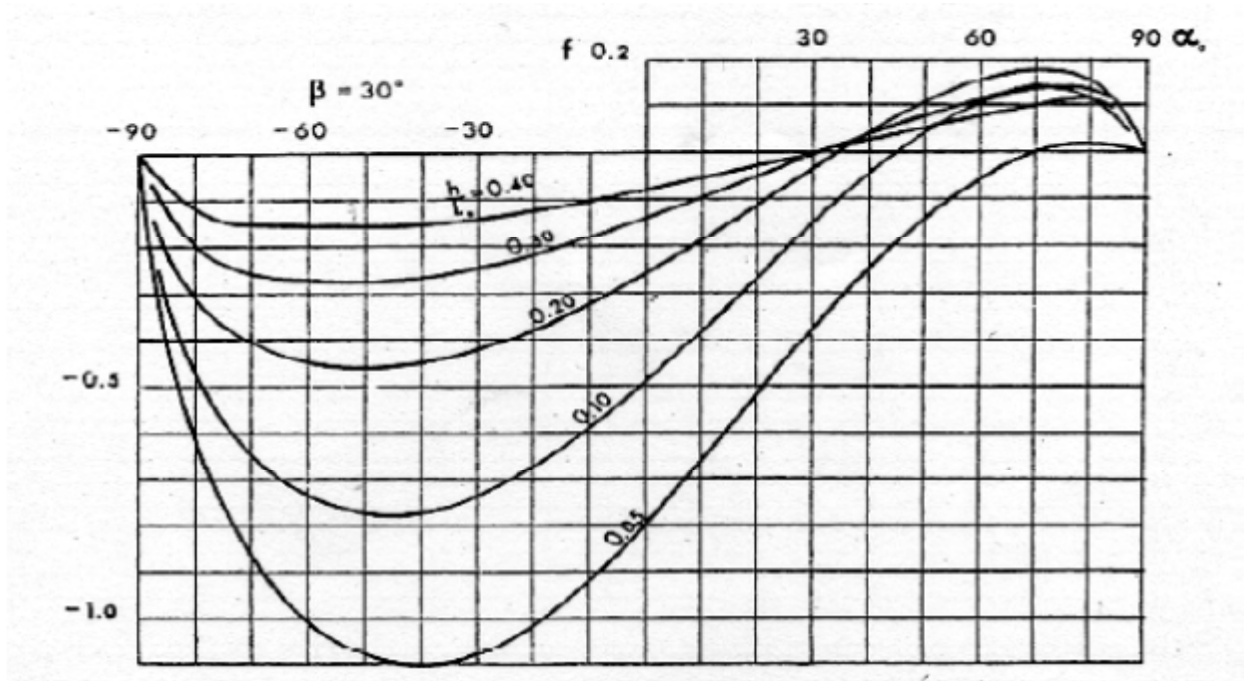


Рисунок 2.4.6.4 – Коэффициент преломления для $\beta = 0$

Рисунок 2.4.6.5 – Коэффициент преломления для $\beta = 15^\circ$ Рисунок 2.4.6.6 – Коэффициент преломления для $\beta = 30^\circ$

Глубину угасания волны (h_y) можно условно рассчитать по формуле (2.4-26)

$$h_y = 0,05 \cdot L_0 \quad (2.4-26)$$

L_0 – длина волны на глубоководье (см. (2.4-23) и (2.4-24)).

2.5 Расчет параметров процесса погружения

Погружение полиэтиленового трубопровода является важной фазой для дюкера. На рисунке 2.5 ниже изображена ситуация во время погружения полиэтиленового трубопровода.

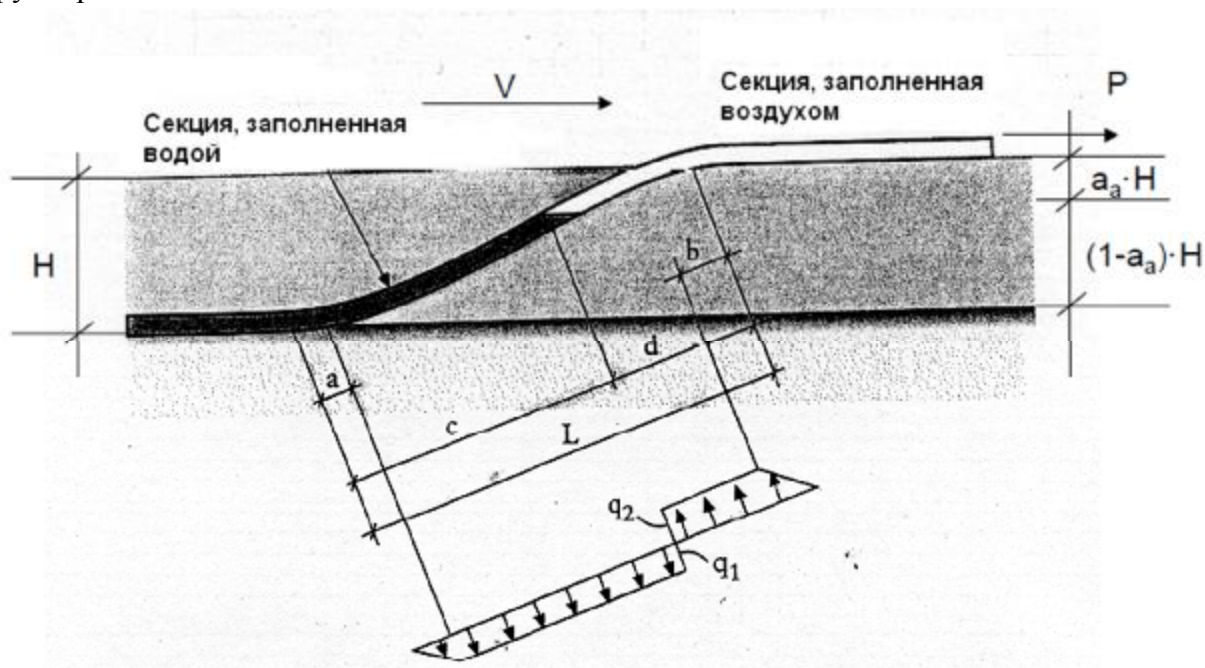


Рисунок 2.5 – Полиэтиленовый трубопровод во время погружения

Для выполнения безопасной установки следует учитывать баланс между силами, действующими вниз q_1 и силами, действующими вверх q_2 . Силы, действующие вниз, главным образом создаются бетонными пригрузами, закрепленными на трубопроводе, а силы направленные вверх возникают из-за плавучести участка заполненного воздухом.

Чтобы начать и продолжать процесс погружения, силы, действующие вниз должны быть немного больше, чем силы действующие вверх.

Контроль этой разницы является существенной и основной задачей при погружении.

Следует избегать перегрузки системы. Это можно контролировать путем регистрации скорости погружения V и регулирования внутреннего давления p .

Если скорость увеличивается, можно увеличить давление воздуха и наоборот.

Для регулирования давления воздуха применяются клапаны и компрессор.

Наиболее критической ситуацией для трубопровода связанной с повреждением, является продольный изгиб на поверхности водоема или на дне из-за уменьшения радиуса изгиба, см. 2.3.5.1.

Для обеспечения достаточного радиуса необходимо прикладывать усилие натяжения P в конце трубы.

В соответствии с рисунком 2.5, есть следующие параметры доступные для контроля и регулирования при погружении:

- давление воздуха (p);
- тяговое усилие (P);

- скорость погружения (V).

В последующих главах приводятся некоторые рекомендации для расчета этих параметров.

2.5.1 Внутреннее давление воздуха

Внутреннее давление зависит от нагрузки создаваемой бетонными пригрузами. Расчет нагрузки описан в 2.4. Важным параметром является степень заполнения воздухом, a_a (см. (2.4-2)).

Для получения секции, заполненной воздухом, изображенной на рисунке 2.5.1, которая будет балансировать вес бетонных пригрузов, необходимо создать внутреннее давление p в трубопроводе.

$$p = a_a \cdot H \quad (2.5-1)$$

p – внутреннее давление (м вод.ст.);

a_a – степень заполнения воздухом;

H – глубина (м).

Как видно из формулы (2.5-1) внутреннее давление зависит от глубины. Это означает, что необходимо повышать давление по мере увеличения глубины. Компрессор должен обладать необходимым потенциалом для производства достаточного количества воздуха, превышающего соответствующее максимальной глубине давление.

Если известен, продольный профиль, то можно рассчитать для трубопровода баланс давления в каждой точке.

Эта кривая или таблица может стать основой для успешной установки.

Отрезки трубы следует использовать, как образцы в отношении длины.

Например, через каждые 50 метров трубы должны быть помечены (маркированы).

2.5.2 Тяговое усилие

Тяговое усилие на конце трубы применяется для контроля позиции труб и увеличения радиуса изгиба (см. рисунок 2.5.2).

Если степень заполнения воздухом составляет менее 50%, то обычно в таких случаях, критический радиус будет на поверхности моря. В противном случае он будет на дне.

Тем не менее, существует простой способ оценить тяговое усилие. Этот метод основан на теории связей между звеньями цепи и действует на глубоководье.

Рисунок 2.5.2 описывает данную ситуацию.

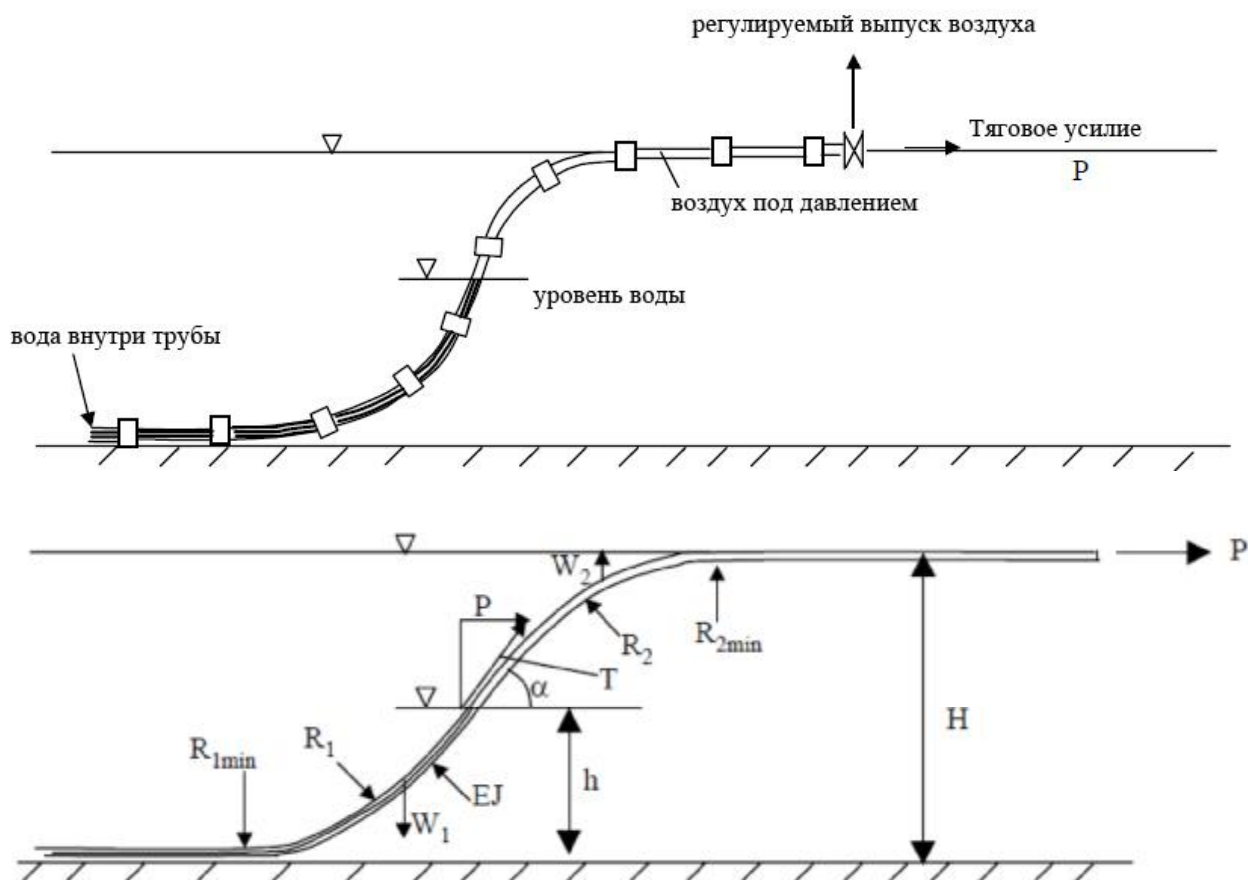


Рисунок 2.5.2 – Процесс, конфигурация и технические параметры полиэтиленовых труб при погружении

Глубоководность определяется следующим образом: $H > 12 \cdot D$ (2.5-2)

На мелководье (начальной фазе погружения) невозможно применить силу к концу трубы до тех пор, пока труба присоединена к стационарному сооружению (стартовый котлован, шахта и др.). После погружения для соединения трубы в конце, необходимо удостовериться, что радиус изгиба больше, чем радиус продольного изгиба (см. таблицу 2.3.5.1).

Для этой цели может применяться формула (2.5-3):

$$R = \frac{L^2}{2 \cdot H} \quad (2.5-3)$$

R – радиус изгиба;

L – длина погружаемой трубы;

H – глубина соединительной трубы.

Может быть необходимым, использовать несколько точек воздействия для погружения трубы во время соединения (т.е. не только в конце трубы).

Если вернуться к рисунку 2.5.2, то можно записать следующие параметры:

H – глубина (м);

h – уровень воды внутри трубы (м);
 w_2 – результирующая плавучесть секции, заполненной воздухом (Н/м);
 w_1 – вес нетто секции заполненной водой (Н/м);
 P – тяговое усилие (Н);
 T – сила натяжения в точке перегиба (Н);
 α – угол между осью трубы и горизонталью в критической точке(°);
 R_1 – радиус изгиба секции, заполненной водой (м);
 R_2 – радиус изгиба секции, заполненной воздухом (м);
 EJ – жесткость трубы.

После этого можно вывести следующие математические отношения:

$$R_{1 \min} = \frac{P}{w_1} \quad (2.5-4)$$

$$R_{2 \min} = \frac{P}{w_2} \quad (2.5-5)$$

$$T = P + w_1 \cdot h \quad (2.5-6)$$

$$\cos \alpha = \frac{P}{P + w_1 \cdot h} \quad (2.5-7)$$

Как уже упоминалось ранее $w_2 > w_1$, если расчетная степень заполнения воздухом составляет менее 50%. В этом случае радиус R_2 на поверхности будет иметь решающее значение, см. (2.5-4) и (2.5-5).

Отношение между w_1 и w_2 можно приближенно можно записать:

$$w_2 = \frac{1-a_a}{a_a} \cdot w_1 \quad (2.5-8)$$

a_a – степень заполнения воздухом ($a > 20\%$).

Из формулы (2.5-4) и (2.5-5), используя критический радиус R_{\min} из таблицы 2.3.5.1, можно найти необходимое тяговое усилие.

$$P_1 = w_1 \cdot R_{\min} \quad (2.5-9)$$

$$P_2 = w_2 \cdot R_{\min} \quad (2.5-10)$$

Наибольшая сила из P_1 и P_2 и будет тяговым усилием, которое должно применяться в проекте.

2.5.3 Скорость погружения

Во избежание воздействия сил ускорения на трубопроводе в процессе установки, скорость погружения должна быть по возможности постоянной.

Поскольку на практике всегда будут существовать некоторые различия в скорости во время установки, то её следует поддерживать на низком уровне.

Если обратится к закону Ньютона:

$$K = m \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2.5-11)$$

K – сила ускорения;
 m – масса в движении;
 ΔV – изменение скорости;
 Δt – изменение во времени.

Видно, что большие изменения в $\frac{\Delta V}{\Delta t}$ создадут большую силу K , действующую на плети трубопровода. Если V сохраняется низкой, то соответственно и ΔV также является низким для данного времени Δt .

Обычно, рекомендованная скорость погружения не должна превышать $0,3 \text{ м/с} \approx 1 \text{ км/ч}$. Однако существуют несколько успешно завершённых проектов, в которых скорость погружения была больше $0,3 \text{ м/с}$.

Скорость погружения регулируется потоком, Q , входящим в трубу. С другой стороны этот поток зависит от имеющегося рабочего давления.

$$\Delta h = a_a \cdot H - p_i \quad (2.5-12)$$

Δh – возможный перепад давления (м вод.ст.);
 H – глубина (м);
 p_i – внутреннее давление (м вод.ст.);
 a_a – расчетная степень заполнения воздухом.

Падение давления может быть выражено, исходя из (2.2-1):

$$\Delta h = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} + k_s \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (2.5-13)$$

f – коэффициент трения ($\approx 0,02$);
 L – длина участка заполненного водой (м);
 D – внутренний диаметр (м);
 V – скорость (м/с);
 g – ускорение силы тяжести ($\approx 9,81 \text{ м/с}^2$);
 k_s – коэффициент местных потерь напора.

Если объединить (2.5-11) и (2.5-12), то можно выразить скорость погружения, как:

$$V = \left[\frac{2 \cdot g \cdot D \cdot (a_a \cdot H - p_i)}{f \cdot L + k_s \cdot D} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.5-14)$$

Из (2.5-13) видно, что V зависит от длины участка заполненного водой L , глубины H и внутреннего давления p_i . Другие параметры практически неизменны. Для поддержания постоянной скорости внутреннее давление p_i должно регулироваться в соответствии с изменениями в L и H .

Зная связь между L и H для проекта, можно вычислить кривую погружения для p_i в зависимости от L . Во время установки эта кривая является основой.

Δh будет отображаться как изменение давления (разрежение) в трубе и должно контролироваться во избежание продольного изгиба (см. (2.3-16)).

Для того чтобы упростить регулирование скорости погружения на начальном этапе процесса погружения, преимущественно иметь большое значение коэффициента местных потерь напора k_s . Это можно осуществить с помощью уменьшения входного диаметра (тройник) по сравнению с основной трубой. Подходящий диаметр может быть в пределах от $1/3 D$ до $1/20 D$ (должно быть проверено под давлением).

Во время погружения рекомендуется сохранять данное отверстие неизменным.

Существует максимальная скорость погружения, при которой погружение полиэтиленовой трубы имеет риск раскачиваться.

Эта скорость может быть оценена примерно по формуле:

$$V = \frac{k \cdot \pi \cdot D^2}{2 \cdot S \cdot H^2 \cdot n} \cdot \left(\frac{E}{2 \cdot SDR \cdot \rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.5-15)$$

k – фактор нагружения ($k = 1,0$ для свободно опертой, $k = 2,25$ для фиксированной ситуации);

S – число Струхала ($\approx 0,2$);

D – внешний диаметр (м);

H – максимальная глубина установки (м);

n – коэффициент безопасности (предположим, $n = 2,0$);

E – модуль упругости (кратковременный) (кН/м^2);

ρ – масса трубы, содержимого (вода) и колеблющейся воды на единицу объема трубы ($\rho \approx 3.0 \text{ т/м}^3 / \text{м}$).

Если принять $E = 8 \cdot 10^5 \text{ кН/м}^2 (800 \text{ МПа})$, $k = 2,0$, а максимальную глубину = 50 м, то формула (2.5-10) может быть преобразована:

$$V = 1,2 \cdot D^2 \cdot (SDR)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.5-16)$$

Формула (2.5-15) дает представление о максимальной скорости погружения, но риск продольного изгиба также должен быть учтён. Для малых диаметров, формула немного консервативна в сравнении с опытом. Колебания во время погружения, как правило, не причиняют вреда трубе.

Для оценки p_i должна быть использована формула (2.5-13):

$$p_i = a_a \cdot H - \frac{V^2(fL + k_s \cdot D)}{2 \cdot g \cdot D} \quad (2.5-17)$$

Максимальная скорость будет ограничена силой сопротивления в связи с появлением течения при движении трубы через воду (см. (2.4-10)).

Если будет осуществляться контролируемое погружение, то возникновение риска потери устойчивости трубы исключено.

На практике для контроля скорости погружения было бы приемлемым засекаать время между, например, 3 последующими бетонными пригрузами исчезающими с поверхности воды.

Если межцентровое расстояние известно, то скорость составит:

$$V = \frac{3 \cdot c}{t} \quad (2.5-18)$$

c – межцентровое расстояние между бетонными пригрузами;

t – засечённое время.

Зафиксированную и подсчитанную скорость следует сравнивать с расчетной скоростью и принимать необходимые меры, если скорость слишком велика (например, закрыть вентиль (клапан), запустить компрессор).

Однако, эта методика по нахождению максимальной скорости погружения для трубопровода носит рекомендательный характер.

Рекомендуется сохранять скорость низкой в случае волн, течения, поломки оборудования для создания тянущего усилия, сбоя во внутреннем давлении, регулировки оборудования и т.д.

Для информации можно сказать, что были успешно проведены два погружения осуществлявшихся следующим образом (из зарубежного опыта):

I) Ø 1600 мм SDR26 PE80

Длина = 2500 м

Максимальная глубина = 50 м

Максимальное тяговое усилие = 500 кН

Нагрузка $a_a = 28\%$

$V_{\max} = 0,46 \text{ м/с}$;

II) Ø 800 мм PE80 SDR17.6

Длина = 500 м

Максимальная глубина = 200 м

Максимальное тяговое усилие = 40 кН

Нагрузка $a_a = 15\%$

$V_{\max} = 1 \text{ м/с}$.

Если использовать формулу, основанную на простом балансе, где кинетическая энергия преобразуется в упругую энергию в трубе, и рассматривать только осевое направление, то получим выражение:

$$V_{\max} = \frac{\sigma_m}{F} \cdot \left[\frac{2}{E \cdot \rho} \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.5-19)$$

V_{\max} – критическая скорость погружения (м/с);

$\sigma_m = \sigma_a - \sigma_T$

σ_m – напряжение (МПа);

σ_a – расчетное напряжение (5,0 МПа);

σ_T – напряжение, создающееся растягивающей силой и нагрузкой a_a ($\approx 2,5$ МПа);
 F – коэффициент безопасности/поправочный коэффициент;
 E – модуль упругости (800 МПа);
 d – внутренний диаметр;
 D – внешний диаметр;
 ρ – плотность воды (кг/м^3).

Если подставить значения, считая трубу тонкостенной, получим:

$$V_{\max} = \frac{7,9}{F \cdot \sqrt{SDR}} \quad (2.5-20)$$

Если применить эту формулу в реальных проектах I) и II), то получается коэффициент безопасности/поправочный коэффициент:

$$F_{\text{I}} = 3,4 \quad F_{\text{II}} = 1,9$$

Если, например, использовать среднее значение двух факторов, то получим ($F = 2,65$):

$$V_{\text{critical}} = \frac{3,0}{\sqrt{SDR}} \quad (2.5-21)$$

Эта формула дает представление о максимальной скорости погружения во время контролируемого погружения (тяговое усилие на конце), избегая повреждения трубы.

Однако, данный расчет скоростей носит рекомендательный характер и следует все же произвести анализ рисков.

Таблица 2.5.3 отображает критические скорости погружения.

Таблица 2.5.3 – Критическая скорость погружения для полиэтиленовых труб

Класс SDR	Критическая скорость погружения	Класс SDR	Критическая скорость погружения
41	0,47	17,6	0,72
33	0,52	17	0,73
27,6	0,57	13,6	0,81
26	0,59	11	0,90
22	0,64	9	1,00

3. УСТАНОВКА ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

В этой главе приведена практическая информация по установке подводных трубопроводов. Также можно обратиться к Приложению 1.

3.1 Соединение полиэтиленовых труб

С тех пор как полиэтиленовые трубы впервые появились на рынке в начале 1960-х годов, были разработаны различные методы соединения.

На сегодняшний день существует множество методов соединения всех размеров полиэтиленовых труб. Они делятся на разъёмные – фланцы, механические муфты и не разъёмные – стыковая сварка, электросварные фитинги.

Сварные соединения являются на сегодняшний день наиболее распространёнными.

Стыковая сварка может применяться на всех размерах полиэтиленовых труб.

Фланцевые соединения используются для сопряжения больших отрезков труб, для соединения с запорной арматурой и с трубами из других материалов.

В случае использования длинных секций заводского изготовления буксируемых при помощи судна к месту прокладки, их желательно соединять друг с другом при помощи фланцевых соединений.

Они могут поставляться с учетом всех размеров труб и могут быть скорректированы в соответствии с предпочтениями клиентов по длине и защите от коррозии.

3.2 Установка

Как было указано в предыдущих главах подводный трубопровод, как правило, устанавливается либо по средствам укладки в траншею, либо с помощью прокладки непосредственно на дне.

3.2.1 Погружение полиэтиленовых труб

Всякий раз, когда уровень воды выше центра полиэтиленовой трубы, труба может быть подвергнута возникающим подъемным силам (сила Архимеда), при условии, что она частично заполнена водой, как показано на рисунке 3.2.1.

Подъемные силы должны быть преодолены за счет тяжести грунта засыпки траншеи и бетонных пригрузов.

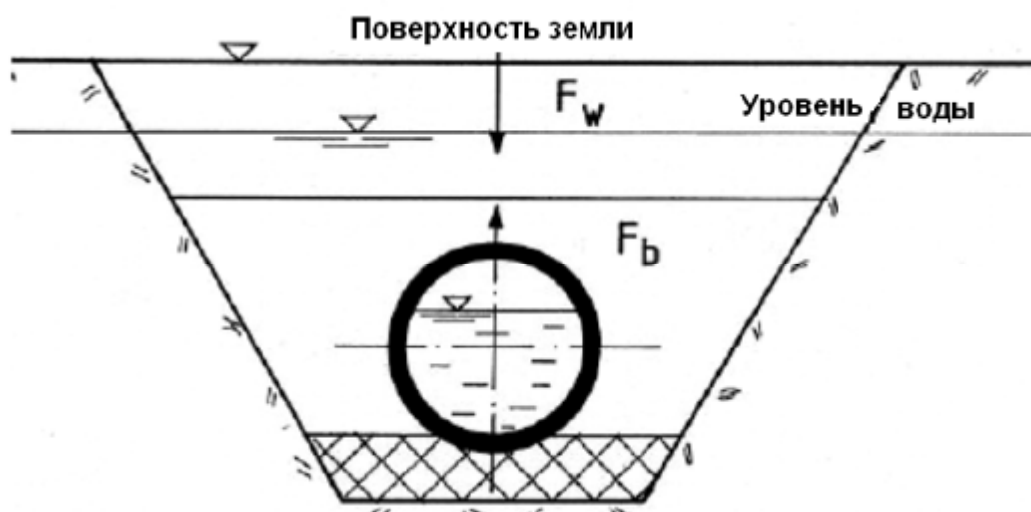


Рисунок 3.2.1 – Полиэтиленовая труба в подводной траншее

Материалы засыпки над трубой в сочетании с бетонными пригрузами обеспечивают нагрузку, нейтрализующую подъем в результате плавучести, желательно с коэффициентом безопасности не менее 2.

Удельный вес почвы уменьшается, когда она погружена в воду:

$$\gamma_{\text{sea}} = \gamma_{\text{air}} - \gamma_{\text{w}}$$

γ_{sea} – удельный вес в море;

γ_{air} – удельный вес в воздухе;

γ_{w} – удельный вес воды.

Уплотнение под водой невозможно. Если требуется уплотнение больше $\text{DPR} = 85\%$, то его можно достигнуть с помощью гравия со степенью уплотнения порядка $\text{DPR} = 85 - 90\%$.

Бетонные пригрузки закрепляются к трубе, которая заполняется воздухом и, находясь на плаву, занимает запланированную позицию над разрытой траншеей, как показано на рисунке 3.2.2.

Когда труба займет необходимое положение, она заполнится водой и опустится на дно траншеи.

Можно начинать засыпку.

Если глубина воды большая и траншея визуально не контролируется с поверхности, то маршрут должен быть обозначен с помощью буюв.

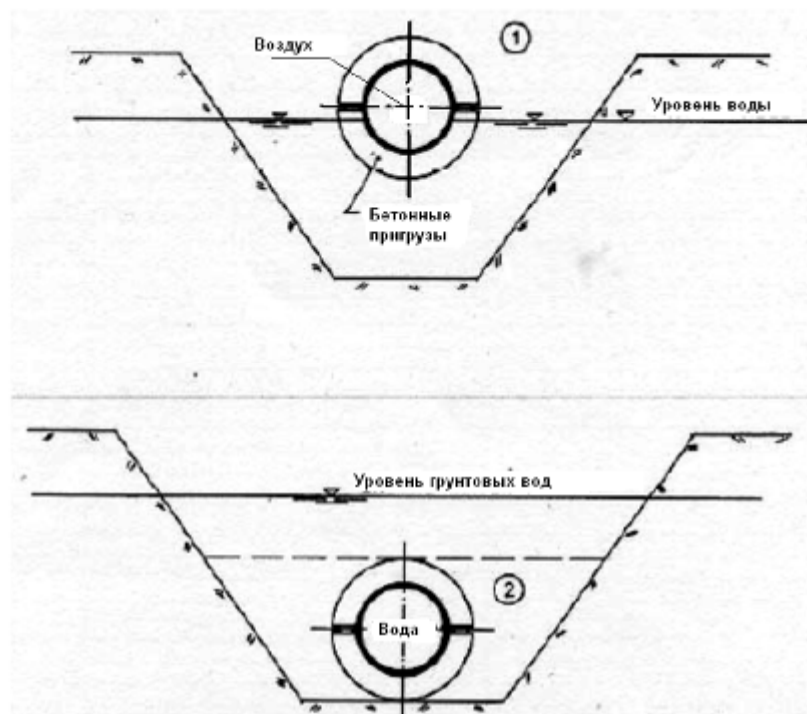


Рисунок 3.2.2 – Установка в траншею

Рытье траншей в мягкой почве под водой может быть осуществлено при помощи струи воздуха или воды для удаления материала, который затем всасывается во время промывки траншеи. Однако, экскаваторы, установленные на судне, более эффективны и имеют большую производительность.

Глубина траншеи зависит от диаметра трубы.

Рекомендуемые значения H , при нормальных условиях (см. рисунок 3.2.3):

$D \leq 500$ мм	$H = 1,75 \rightarrow 2,0$ м
$D \leq 1000$ мм	$H = 2,25 \rightarrow 2,5$ м
$D > 1000$ мм	$H = 2,5$ м

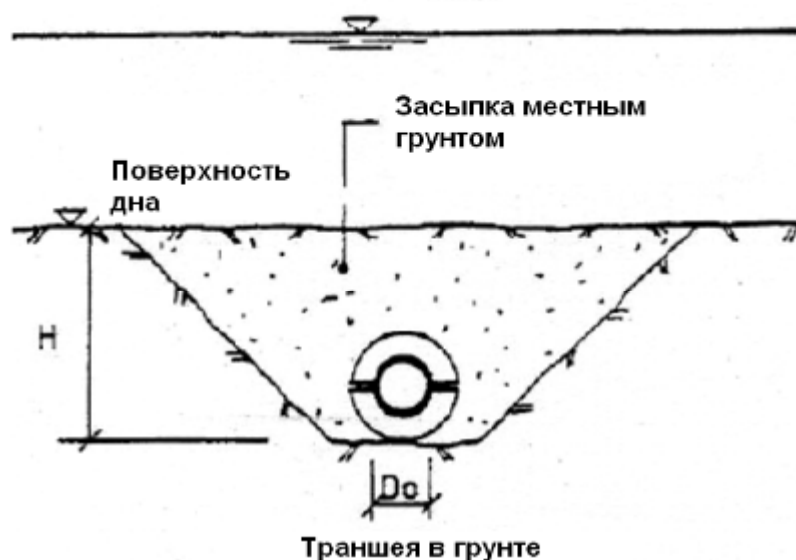


Рисунок 3.2.3 – Глубина траншеи в почве

Для засыпки может быть использован материал дна (местный грунт) или гравий. После того как трубы положили, дно над ними должно быть восстановлено в его первоначальном состоянии. В противном случае, волны и течения будут разрушать измененный профиль.

Для защиты в районах, где дно подвергается эрозии, рекомендуется использовать габионы заполненные щебнем.

Рисунок 3.2.4 иллюстрирует траншею в горных породах. Прокладка траншей в горных породах, значительно дороже, чем в «мягких» грунтах.

Скальный грунт часто расположен в зоне прибоя близко к берегу.

Для защиты труб, рекомендуется, чтобы верхний слой траншеи был покрыт слоем бетона, залитого под водой.

Слой бетона должен быть усилен и заанкерован как показано на рисунке 3.2.4.

В противном случае подъёмная сила, возникающая под воздействием волн, может сместить бетон.

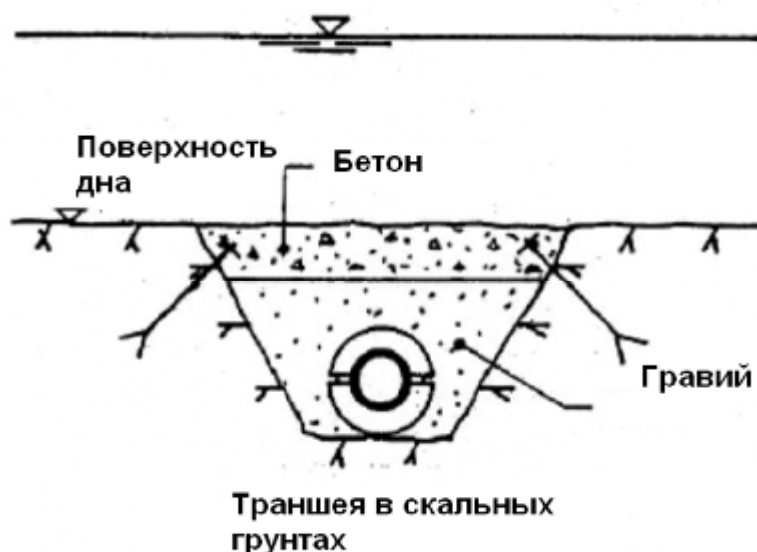


Рисунок 3.2.4 – Траншея в горных породах

В качестве альтернативы, для тех же целей могут быть использованы габионы заполненные щебнем.

Обратная засыпка труб должна производиться из гравия или щебня, с высокой степенью уплотнения, скажем, $d = 22 \rightarrow 32$ мм.

3.2.2 Установка трубы на дне

Эта процедура, кратко описана и рассчитана в Приложении 1 и пункте 2.5.

До погружения должна быть разработана процедура погружения с учетом всех соответствующих факторов, которые могут возникнуть во время установки.

Подводный трубопровод будет сооружен с помощью сопряжения отдельных труб длиной 10-25м в плеть или участок, либо при помощи непрерывно экструдированных на заводе длинных отрезков.

Плеть должна быть как можно длиннее, но ее длина зависит от доступного пространства на стройплощадке. Вообще, рекомендуемые отрезки, которыми можно оперировать:

$$L (\text{участка}) = 500 - 700 \text{ м}$$

Когда идёт производство в длинных отрезках, каждая плеть или участок может иметь общую длину также 500-700 метров в зависимости от диаметра трубы и условий буксировки (тип водного пространства, погодные условия и т.д.).

Трубы должны быть утяжелены бетонными пригрузами. Пригрузки могут быть закреплены до запуска трубы в море, либо на барже, если она поставляется длинными отрезками.

Трубы, буксируемые к месту установки, должны храниться в плавучем положении, в месте, защищенном от ветра и волн, а также должны быть надежно закреплены.

Рисунки 3.2.5 и 3.2.6 схематично показывают, как подводный трубопровод устанавливается на дне.

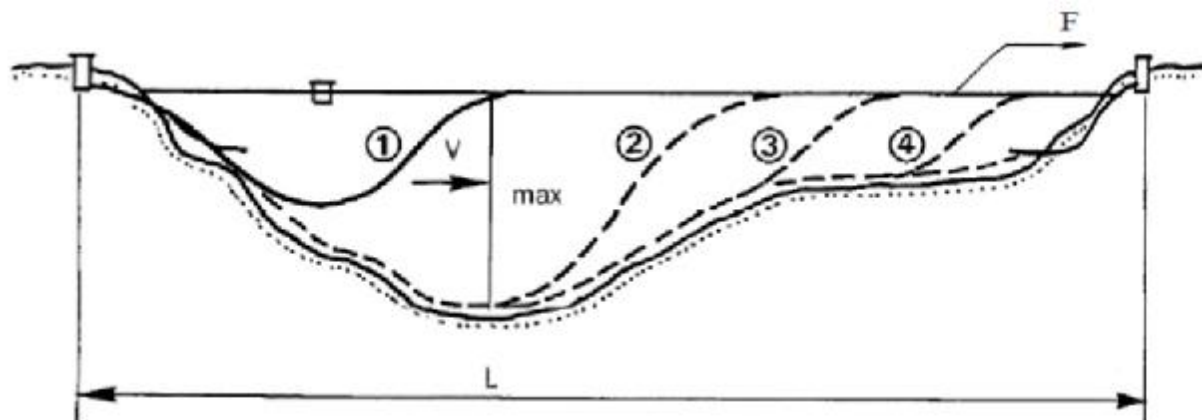


Рисунок 3.2.5 – Установка транзитного трубопровода

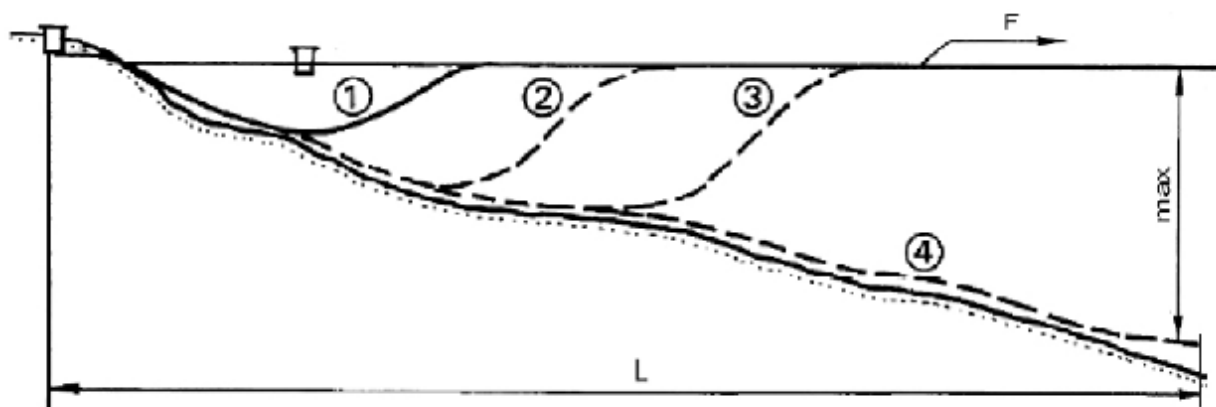


Рисунок 3.2.6 – Установка водозаборного или водоотводящего трубопровода

Трубопроводные системы погружают в направлении от берега к наружной или другой стороне водоёма. Как правило, все трубы погружаются за одну операцию. Если условия окружающей среды являются негативными и варьируются от спокойных до бушующих, то трубы могут быть проложены отрезками, шаг за шагом. Также установка труб отрезками может быть удобна по причинам практичности.

После затопления первого отрезка, его герметичный фланцевый конец лежит на дне. В период спокойной погоды, труба заполняется воздухом для того чтобы поднять её конец на поверхность, и погружение продолжится, как только следующий отрезок будет соединён при помощи фланцевого соединения. Во избежание деформации во время присоединения следует обеспечивать тяговое усилие вдоль запроектированного маршрута.

Есть также и другие способы соединения отрезков труб для последовательного погружения. В зависимости от ресурсов подрядчика выше и ниже уровня моря, присоединение может быть на дне, на средней глубине или в надводном положении. В зависимости от метода погружения, могут потребоваться короткие куски трубы для соединения концов участков на дне. После погружения водолазы смонтируют эти куски и отрезки на основе точной геодезической съёмки.

Во время погружения, вода может заполнять трубу одним из следующих способов:

1. Заглушка с клапаном на берегу, а вода подаётся с помощью насоса;
2. Заглушка с вентилем, расположенная в открытой воде, на глубине от 2 до 5 метров, с заполнением водой непосредственно при помощи открытия вентиля;
3. Заглушка с клапаном на впускной/выпускной камере, труба присоединяется к отдельному фланцу в стенке камеры.

Скорость погружения V должна быть регламентирована и не должна превышать расчетную V_{\max} (см. 2.5.3).

На конце должен быть механизм клапана для выпуска воздуха и регулирования давления, а также компрессор для заполнения воздухом.

Тяговое усилие F и внутреннее давление воздуха должны приниматься в соответствии с расчетами в главах 2.5.1 и 2.5.2.

Скорость погружения должна быть проверена и зарегистрирована во время затопления. Если скорость слишком велика, то необходимо отрегулировать внутреннее давление. Тяговое усилие может быть постоянным или скорректировано на глубине.

До погружения, убедитесь, что:

- все болты снова протянуты до их окончательного момента затяжки (это относится и к болтам для бетонных пригрузов и к болтам для фланцевых соединений);
- все бетонные при грузы на их правильном месте/положении (проверить путем измерения);
- все необходимые дополнительные устройства находятся под рукой, в том числе:
 - воздушный манометр, с шагом 0,01 бар;
 - водопроводные клапана подходящего диаметра;
 - заглушки, снабженные воздушными клапанами, от 1" до 2" (вход / выход);
 - водопроводный клапан (вход/выход);
 - воздушный компрессор с достаточной мощностью;
 - водяной насос с достаточной мощностью.

Для предоставления необходимого тягового усилия должен быть доступен буксир или другие суда.

Должна быть точно известна мощность его двигателя на полной скорости, с погрешностью до 10%.

Небольшие буксиры и другие суда, могут быть использованы для обеспечения горизонтального управления плавающей трубой с целью расположения трубы вдоль запроектированного маршрута.

Погружение полиэтиленового трубопровода, как правило, успешно при условии правильного планирования, достатка ресурсов и принятия во внимание погодных условий.

4. Библиография

1. L.-E. Janson and Borealis «Plastics Pipes for Water Supply and Sewage Disposal», 1995.
2. СН 550-82. Инструкция по проектированию технологических трубопроводов из пластмассовых труб.
3. F. M. White «Fluid Mechanics», 1986.
4. L.-E. Janson «Plaströri VA-tekniken», 1971.
5. ГОСТ 18599-2001 с изм. №1. Трубы напорные из полиэтилена.
6. СП 40-102-2000. Проектирование и монтаж трубопроводов систем водоснабжения и канализации из полимерных материалов.
7. Technical Catalogue for Submarine Installations of Polyethylene Pipes.
8. L.-E. Janson and J. Molin «Design and installation of Buried Plastic Pipes», ISBN 87-983636-0-3.
9. ТУ 2248-016-40270293-2002. Трубы напорные из полиэтилена ПЭ 100.
10. Шевелев Ф.А., Шевелев А.Ф. «Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб».
11. Лукиных А.А., Лукиных Н.А. «Таблицы для гидравлического расчета канализационных сетей и дюкеров по формуле акад. Н.Н. Павловского».
12. I. Larsen: Marine Waste Water Discharges «Design of marine PE pipes for transient and long-term under-pressure», 2002.
13. Пособие по проектированию технологических трубопроводов из пластмассовых труб (к СН 550-82).

Приложение 1 (справочное)

Описание конкретного проекта (См. также раздел 2.5)

Типичный пример погружения ПЭ-трубопровода, произведенного большой длиной. Пример описывает водоотводящий трубопровод.

Введение

Проект имеет следующие характеристики:

- Материал трубы: Ø 1200 мм ПЭ100 SDR26;
- Длина трубопровода: 4600 м;
- Длина диффузора: 400 м;
- Максимальная глубина: 61 м;
- Степень заполнения в процентах: 20%.

Последовательное составление описания связано с процессом погружения и необходимыми мерами предосторожности, которые следует предпринять для обеспечения безопасной установки на дне.

Есть два различных метода, которые будут использоваться, один для самого трубопровода, а другой для диффузора.

Погружение трубопровода в основном проводится с помощью естественных сил природы, то есть сила тяжести, плавучесть и давление воздуха, в то время как погружение диффузора предусматривает использование кранов.

Это примечание лишь приблизительное описание основных элементов в фазе погружения. До реальной установки должна быть подготовлена подробная методика погружения.

Погружение трубопровода

Трубы должны быть отбуксированы от предприятия изготовителя к месту установки с помощью буксира.

Трубопровод будет доставлен секциями длиной 400-600м. По прибытию трубы будут храниться в надводном положении, как показано на рисунке 1 ниже.



Рисунок 1 – Хранение участков трубопровода

Важно найти монтажно-сборочную площадку, защищенную от волн и течений. Каждый отрезок остается заполненным воздухом и оснащается заглушками с глухими фланцами на каждом конце.

Следующий этап работы заключается в установке бетонных пригрузов. Они устанавливаются на трубопроводе на определенном расстоянии между центрами. Это расстояние, которое может изменяться вдоль трубопровода, зависит от расчетной силы, действующей на определённой глубине. Пригрузки могут быть установлены как на берегу, так и вне берега. Рисунок 2 иллюстрирует установку, где бетонные пригрузки крепятся к трубе на берегу и спускаются на воду с использованием кранов и экскаваторов.



Рисунок 2 – Бетонные пригрузки крепятся к трубопроводу

Когда все секции нагружены, они должны быть закреплены между собой с помощью фланцев или втулок. Эта работа, как правило, проводится, двигаясь в направлении от берега, и поддерживается баржами и кранами. На рисунке 3 показан типовой монтаж.



Рисунок 3 – Две секции трубы, закрепленные между собой при помощи фланцев

Когда все секции трубопровода закреплены между собой, трубопровод готов к процессу погружения. Трубопровод оснащен заглушками с каждого конца. В самом дальнем конце заглушка также оснащена штуцерами и клапанами для отвода воздуха и заполнения водой.

До начала затопления, маршрут должен быть правильно обозначен буйами, плавающими на поверхности моря. Кроме того, очень важно прислушиваться к местному прогнозу погоды. Желательно отсутствие ветра и волн во время процесса погружения.

Трубопровод корректируется и правильно располагается при помощи судов, барж и лодок. Дальний конец соединяется с водоотводящей шахтой при помощи фланцев. Там должна быть установлена труба через стену шахты для того чтобы морская вода могла попасть в шахту во время погружения. Может быть установлен клапан для регулирования потока.

Перед тем как соединить фланцы, внутреннее давление воздуха в трубопроводе должно быть скорректировано до величины давления на глубине присоединения (например, +0,3 бар, если начальная глубина 3 метра). Компрессор позволяет производить эти настройки. Причина заключается в предотвращении возможности отклонения трубопровода.

Кроме того, перед началом затопления важно приложить тяговое усилие на дальнем конце трубы. Эта сила может изменяться в ходе операции погружения и должна быть рассчитана заблаговременно. Предварительные расчеты в данном проекте показывают, что максимальная сила тяги будет около 40 тонн.

Погружение начинается с осторожного открытия воздушного клапана на дальнем конце и контроля давления внутри с помощью манометра на случай необходимости заполнения трубы сжатым воздухом. Предварительно следует рассчитать кривую необходимого давления воздуха в зависимости от глубины погружения. Регулируя внутреннее давление в соответствии с этой кривой, получим контролируемое погружение с почти постоянной скоростью. Скорость погружения в конкретном проекте может быть около 0,3 м/с.

S-образный изгиб означает равновесие между силами, действующими вниз (т.е. вес бетона) и силы, действующие вверх (то есть выталкивающая сила воздуха, заполнившего трубопровод). Эта ситуация проиллюстрирована на рисунке 4.

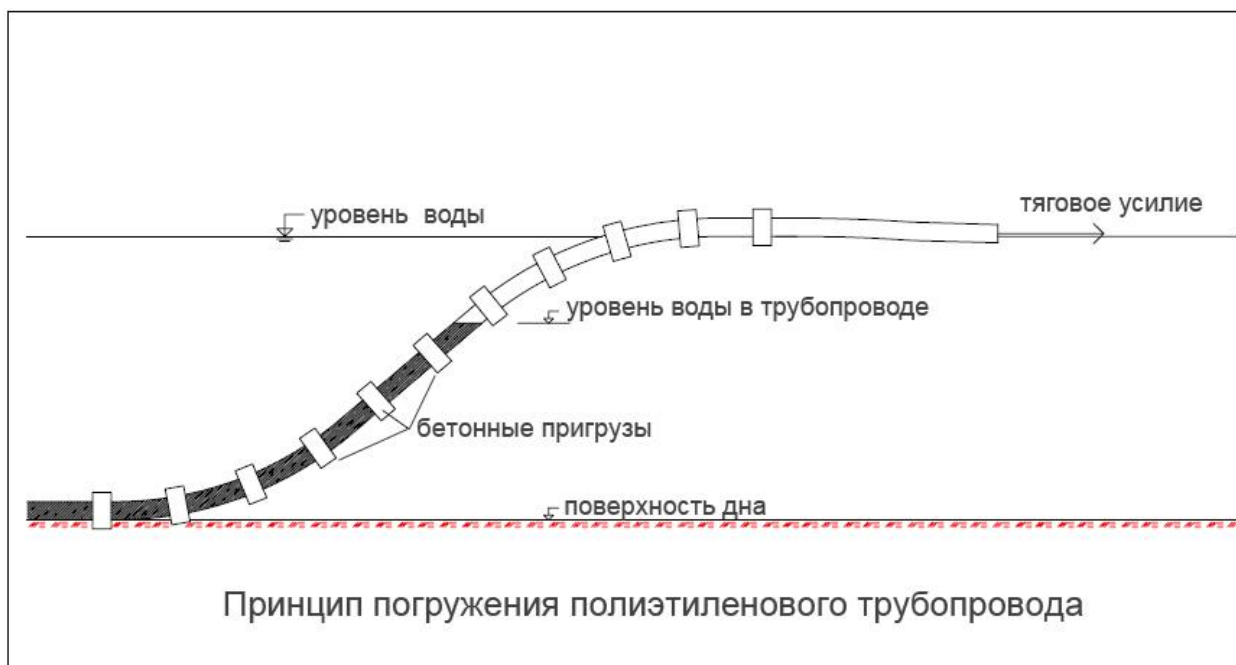


Рисунок 4 – Полиэтиленовый трубопровод во время погружения

Критическим фактором здесь является радиус кривизны на поверхности моря. Если этот радиус меньше, чем примерно 50м в этом случае, то трубопровод попадает под риск потери устойчивости (коэффициент безопасности = 2).

Работы по погружению необходимо проводить в качестве постоянного процесса. Если погружение останавливается, то со временем модуль упругости E для полиэтилена будет уменьшаться и минимальный радиус кривизны будет сокращен аналогично. Это может привести к потере устойчивости труб. Если по какой-либо причине необходимо прервать установку, то очень важно запустить компрессор и обратить вспять процесс погружения.

Можно предположить, что S-образная конфигурация будет преобразована в J-образную конфигурацию, когда будет погружен самый дальний от центра конец трубы. В этой позиции следует использовать правильную величину силы тяги, а также правильную скорость погружения для предотвращения динамических перегрузок, когда последний объем воздуха выходит из трубы. Длина тянущего троса также должна соответствовать максимальной глубине, чтобы обеспечить безопасную "посадку" на дне для конца трубы. Когда сила тяги постепенно сводится к нулю и происходит "посадка".

На рисунке 5 и 6 показан трубопровод во время процесса погружения. Также можно заметить лодку поддержки и тянущийся трос от буксира к дальнему концу.



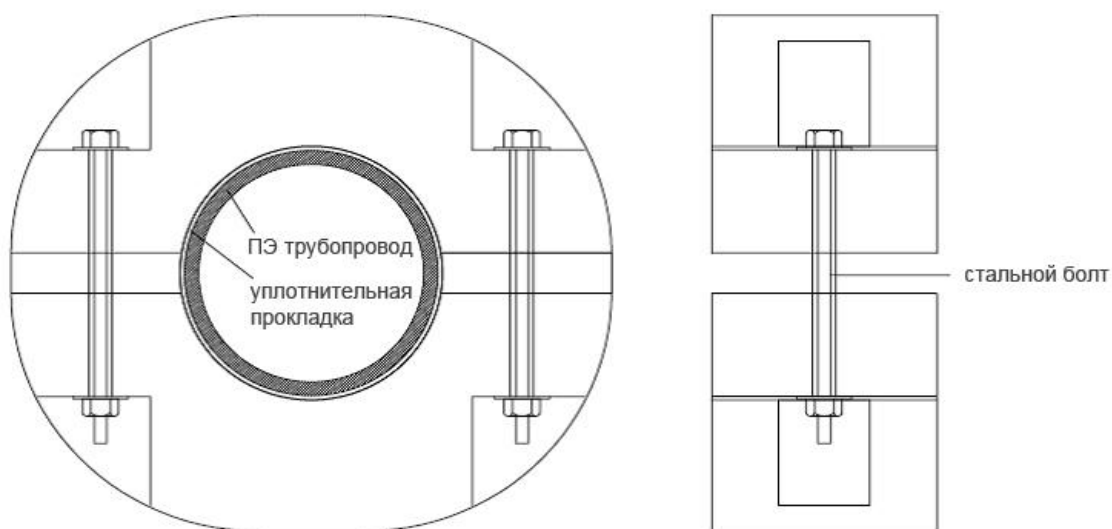
Рисунок 5 – Процесс погружения уже начался



Рисунок 6 – Незадолго до того, как конец трубопровода покинет поверхность и погрузится

Следует также отметить, что бетонные пригрузки для предотвращения скольжения во время установки следует закреплять должным образом к трубопроводу. Для увеличения

коэффициента трения и во избежание царапин на поверхности трубы, рекомендуется устанавливать уплотнения в виде резиновых прокладок (например, EPDM – этилен-пропилен-диен-каучук) между трубой и бетонными пригрузами. Пример бетонной системы пригрузов приводится на рисунке 7.



Пример круглого бетонного пригруза для ПЭ трубопровода

Рисунок 7 – Система бетонных пригрузов

Чтобы обеспечить достаточное усилие на болтах, момент затяжки для болтов необходимо рассчитать. Иногда также возможно использование резиновых прокладок на болтах.

Установка диффузора

Погружение диффузора отличается от погружения трубопровода.

Диффузор производится или собирается в один отрезок (40м длиной в данном случае) и буксируется к стройплощадке так же, как и отрезки трубопровода. Трубы из материала ПЭ100 SDR26 и диаметр варьируется от Ø1200мм до Ø500мм. Подрядчик будет сверлить отверстия в диффузоре на месте. Бетонные пригрузы и плавучие элементы будут закреплены на трубе перед погружением.

Потенциал плавучести элементов должен быть выше, чем вес труб, включая прикрепленные пригрузы.

Способ погружения заключается в опускании трубы с баржи как балки. На рисунке 8 изображен принцип установки.

Ни один участок диффузора не должен быть поднят из воды. В противном случае напряжения будут слишком высокими для материала ПЭ100 и диффузору будет причинен ущерб.

Должен осуществляться тщательный расчет статической системы во время погружения.

Этот расчет включает в себя, сколько необходимо точек фиксации и точек для зацепления краном для обеспечения безопасной установки. В данном проекте предполагается 4 точки зацепления. Это означает, что необходимо 4 лодки/баржи с кранами, если погружать диффузор одним отрезком. Существует альтернатива разделить диффузор на 4 части и погрузить их по отдельности. В этом случае они будут сопряжены на дне или несколько выше при помощи фланцевого соединения.

Выбор метода будет зависеть от имеющихся ресурсов и затрат/оценок рисков.

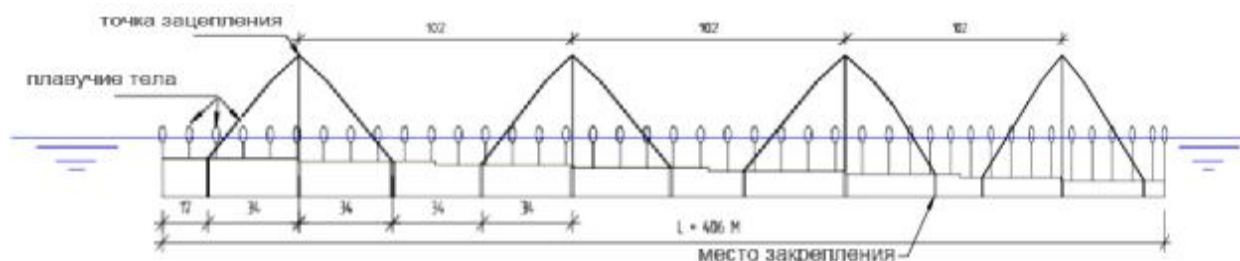


Рисунок 8 – Принцип погружения диффузора как балки

Если соотношение между радиусом кривизны и диаметром трубы (R/D) = 20, то будет присутствовать деформация или продольный изгиб трубы. Максимально допустимое напряжение в материале трубы в фазе потопления не должно превышать 10 МПа.

Предварительные расчеты показывают, что погружение не может быть закончено без поддержки плавучих тел (обычно буи). Это означает, что перед погружением только часть установленных плавучих тел, могут быть отстранены при помощи крана от рабочего процесса на поверхности воды.

В расчетах необходимой поддержки со стороны таких тел, коэффициент безопасности в отношении потери устойчивости не должен быть меньше 3. Однако, с учетом процесса погружения он будет зависеть также от волн и течения.

Коэффициент безопасности в отношении потери устойчивости = 3,0 дает $R/D_{\text{мин.}} = 60$.

Модуль упругости для полиэтилена принимается равным 300 МПа. Такое значение соответствует 1,5% деформации материала в течение примерно 24 часов при температуре 30°C. Если погружение занимает больше времени, ситуация будет более неблагоприятной из-за уменьшения модуля упругости.

Плавучие тела в данном проекте должны выдержать давление воды на глубине 60 метров (в зависимости от глубины). Они не должны скользить по трубопроводу во время погружения.

Как показано на рисунке 8, краны должны работать одновременно, чтобы опустить диффузор. Этот метод требует определенной системы связи между операторами.

Погодные условия

Ожидаемые сроки для всей работы с основной трубой, в том числе соединение разных секций и процесс погружения, вероятно, будет около 3-5 дней. Необходимый период благоприятных погодных условий для процесса погружения составляет 12 часов.

Вероятные сроки необходимые для погружения диффузора предположительно 12 часов. Включая подготовку к погружению, сроки возрастают до 1-2 дней.

Данные о прогнозе погоды и волн имеют большое значение в ходе подготовки к процессу погружения. Высота волны не должна превышать 1 м во время погружения трубопровода. Чем меньше активность волн, тем больше коэффициент безопасности в отношении повреждения труб.

Выводы

Во время погружения водоотводящего трубопровода в данном проекте необходимо учитывать следующие факторы:

- Подробная проработка процедуры погружения, включая технические параметры, необходимые ресурсы, системы связи и аварийные мероприятия;
- Подробные расчеты кривизны погружения;
- Тяговое усилие на конце должно быть приблизительно 40 тонн;
- Скорость погружения не должна превышать 0,3 м/с;
- Компрессор должен работать под давлением в диапазоне до 7 бар;
- Должна быть подсчитана кривая давления воздуха в зависимости от глубины;
- Критический радиус кривизны составляет примерно 50 метров;
- Погружение должно проводиться как непрерывный процесс;
- Бетонные пригрузы должны быть надежно зафиксированы;
- Погодные условия должны быть удовлетворительными;
- Диффузор должен быть установлен как балка с использованием кранов;
- Во время спуска диффузора должны быть рассчитаны статические системы;
- Диффузор должен быть сопряжён с главным трубопроводом на дне;
- Погружение проводится при содействии руководителя с опытом работы в этой области.

Рекомендуется делать как можно больше монтажных работ на поверхности моря. Использование водолазов должно быть минимальным. Также рекомендуется сделать всю сварку на заводе производителе, если это возможно.

Приложение 2 (справочное)

Примеры расчетов к разделу 2.2:

Пример 1

Определить число Рейнольдса для расхода 100 л/с в трубе с внутренним диаметром 327,4 мм. $T=10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Решение:

Сначала вычисляется скорость V из (2.2-3): $V = \frac{4 \cdot 0,100}{\pi \cdot 0,3274^2} \text{ м/с} = 1,19 \text{ м/с}$

Число Рейнольдса определяется из (2.2-2): $Re = \frac{1,19 \cdot 0,3274}{1,31 \cdot 10^{-6}} = 2,97 \cdot 10^5$

Пример 2

Используя данные из Примера 1, рассчитать трубопровод для транспортировки питьевой воды. Найти коэффициент трения f .

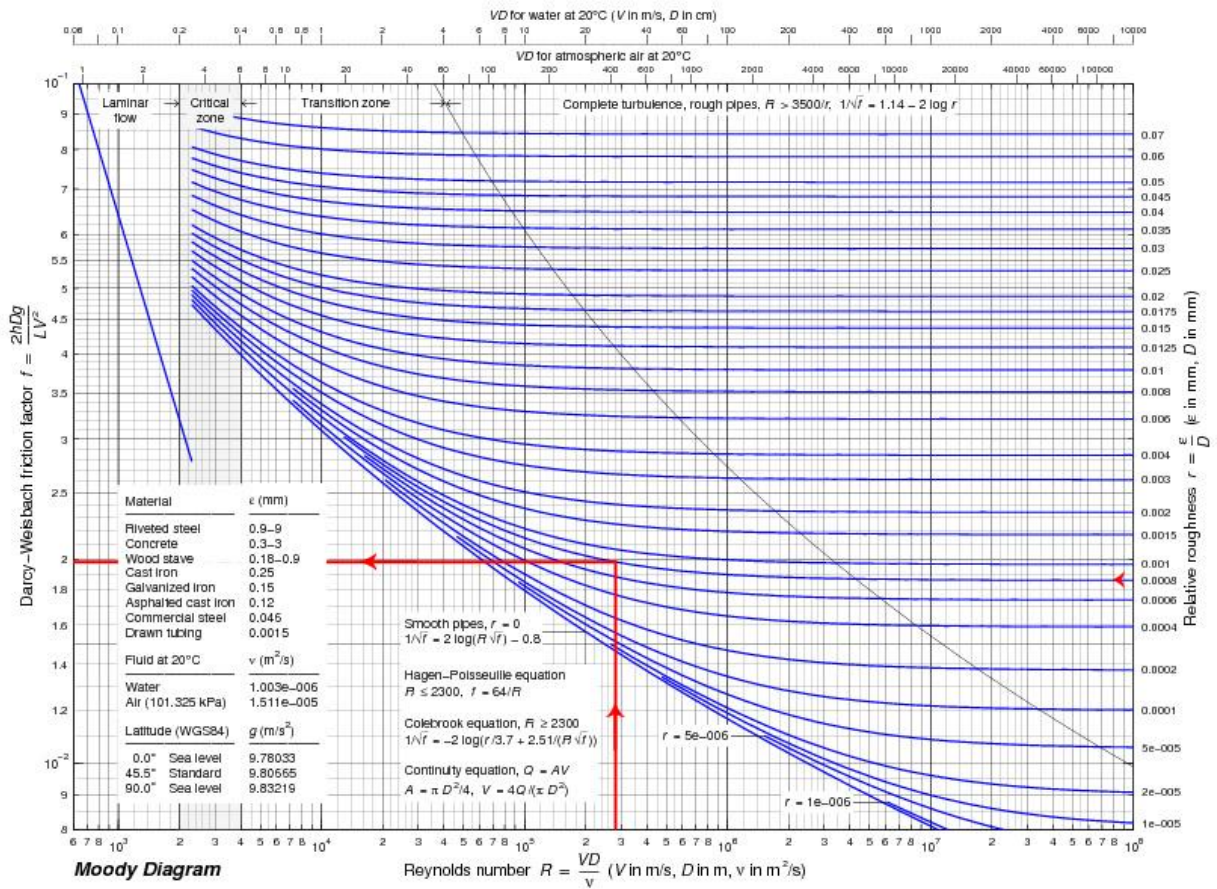
Решение:

Число Рейнольдса уже подсчитано в примере 1: $Re = 2,97 \cdot 10^5$

Теперь следует найти относительную шероховатость r_r : $\varepsilon = 0,25 \text{ мм}$

Отсюда: $r_r = \frac{0,25}{327,4} = 0,0008$

Зная Re и r_r , выбирается f по рисунку 2.2.1, как показано на рисунке красными линиями и стрелками.



Результат: $f \approx 0,02$

Для грубых оценок без диаграммы Муди, обычно часто используют усредненное значение $f = 0,02$.

Пример 3

Рассчитать потери давления на трение в трубопроводе, описанном в примере 1 и 2, если длина 2500 м.

Решение:

Формула (2.2-5) дает результат в метрах водного столба:

$$\Delta h_f = 0,02 \cdot \frac{2500}{0,3274} \cdot \frac{1,19^2}{2 \cdot 9,81} = 11,03 \text{ м водн. ст.}$$

Чтобы преобразовать это значение в Па (Н/м²) используем отношение (2.2-6):

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

p – давление (Н/м² = Па);

ρ – плотность воды (1000 кг/м³);

g – ускорение свободного падения (9,81 м/с²).

Это дает: $p = 1000 \cdot 9,81 \cdot 11,03 \text{ Па} = 108204 \text{ Па}$

Если разделить это значение на 10^5 , то получим значение в атмосферах (бар), а если делить его на 10^6 , то получим МПа.

$$p = \frac{108204}{100000} \text{ бар} = 1,08 \text{ бар}$$

$$p = \frac{108204}{1000000} \text{ МПа} = 0,108 \text{ МПа}$$

Пример 4

Труба, описанная в Примере 1 содержащая 3х90° отвода, 25 сварных швов и имеющая выход в вышерасположенное водохранилище. Рассчитайте общую потерю давления.

Решение:

Из таблицы 2.2.2 найдем коэффициенты:

$$90^\circ \text{ отвод} \Rightarrow k = 1,1 \cdot \left(\frac{90^\circ}{90^\circ}\right)^2 = 1,1;$$

$$\text{Сварной шов} \Rightarrow k = 0,03;$$

$$\text{Выход} \Rightarrow k = 1,0.$$

Общая сумма коэффициентов составляет: $\Sigma k = 3 \cdot 1,1 + 25 \cdot 0,03 + 1,0 = 5,05$

$$\text{Всего местных потерь напора: } \Delta h_s = 5,05 \cdot \frac{1,19^2}{2 \cdot 9,81} \text{ м водн. ст.} = 0,36 \text{ м водн. ст.}$$

Пример 5

Рассчитайте сопротивление для морской воды в выпускном трубопроводе, установленном на 50-ти метровой глубине в море. Плотность сточных вод составляет 1000 кг/м^3 , в то время как плотность морской воды 1025 кг/м^3 .

Решение:

$$\text{Формула (2.2-8) дает: } \Delta h_p = \frac{1025-1000}{1000} \cdot 50 \text{ м водн. ст.} = 1,25 \text{ м водн. ст.}$$

Пример 6

Найти оптимальный диаметр D , для перепадов давления приведенных в примере 3, 4 и 5 и для расхода $Q = 100 \text{ л/с}$. $SDR = 11$.

Решение:

Находим приблизительный диаметр из (2.2-10)

$$D = \left[\frac{8 \cdot 0,02 \cdot 0,1^2 \cdot 2500}{9,81 \cdot \pi^2 (11,03 + 0,36 + 1,25 - 1,25)} \right]^{\frac{1}{5}} \text{ м} = 0,325 \text{ м} = 325 \text{ мм}$$

Ближайший стандартный диаметр SDR11 выше 325 мм это 327,4 мм (Ø 400 мм).
Это значение диаметра подставляется в (2.2-11).

$$\text{Отсюда: } Q = \frac{\pi \cdot 0,3274^2}{4} \cdot \left[\frac{2 \cdot (11,03 + 0,36 + 1,25 - 1,25) \cdot 0,3274 \cdot 9,81}{0,02 \cdot 2500 + 5,05 \cdot 0,3274} \right]^{\frac{1}{2}} = 0,1 \text{ м}^2/\text{с} = 100 \text{ л/с}$$

Что и требовалось доказать.

Пример 7

Водоотводящий трубопровод длиной 2500 метров и заканчивающийся на глубине 50 метров. Расчётный поток 100 л/с и известен перепад давления 13 м вод.ст. Плотность в морской воде 1025 кг/м³.

Необходимо рассчитать необходимый диаметр трубы, пренебрегая местными потерями напора.

Решение:

Сначала найдем потерю напора из-за разницы в плотности:

$$\Delta h = \frac{1025 - 1000}{1000} \cdot 50 \text{ м вод. ст.} = 1,25 \text{ м вод. ст.}$$

Суммарное падение напора: $\Delta h_p = (13 - 1,25) \text{ м вод. ст.} = 11,75 \text{ м вод. ст.}$

Находим значение линии падения напора I: $I = \frac{11,75}{2500} \cdot 1000\text{‰} = 4,7 \text{ ‰}$

Применим график 2.2.4 с величинами

$Q = 100 \text{ л/с}$ и $I = 4,7 \text{ ‰}$

Точка пересечения дает: $D = 340 \text{ мм}$

Учитывая местные потери напора, следует выбрать ближайший больший стандартный диаметр. Для SDR11 это Ø 450 мм, $d_i = 368,2 \text{ мм}$.

Пример 6 похож на пример 7. В последнем случае получается больший на один шаг диаметр.

Разница в стоимости между этими двумя результатами для 2500 метров трубопровода в сумме составит значимое увеличение затрат.

Этот случай является мотивирующим примером для проведения надлежащих гидравлических расчетов.

Пример 8

Проверить самоочищаемость трубопровода Ø 400 мм ПЭ100 SDR11 в примере 6.

Решение:

Сначала следует найти уклон линии потери напора на трение: $I = \frac{11,03}{2500} = 0,0044$

Отсюда, используя (2.2-12): $\tau = 1000 \cdot 9,81 \cdot \frac{0,3272}{4} \cdot 0,0044 \text{ Н/м} = 3,5 \text{ Н/м}$

Как видно касательное напряжение $< 4,0$. Поэтому следует ожидать некоторые отложения в трубопроводе.

В таком случае может быть полезна установка оборудования для промывки и использование приспособлений для прочистки.

Пример 9

Рассчитать критическую скорость для транспортировки воздуха в трубопроводе с уклоном $\alpha = 10^\circ$ и внутренним диаметром $D_i = 500 \text{ мм}$.

Решение:

Из рисунка 2.2.6 получаем: $k = 0,75$.

Если подставить это значение в (2.2-13): $U_k = 0,75 \cdot \sqrt{9,81 \cdot 0,5} \text{ м/с} = 1,66 \text{ м/с}$

Как видно, система требует достаточно высокой скорости для переноса воздуха.

Если скорость в трубе выше, чем 1,66 м/с, то пузырьки воздуха уносятся с водой.

Если скорость меньше, чем 1,66 м/с, то при условии отсутствия подъемов и спадов на трассе, пузырьки воздуха будут возвращаться для высвобождения на берегу.

Приложение 3 (справочное)

Примеры расчетов к разделу 2.3:

Пример 1

Найти толщину стенки для трубы $\varnothing 200$ мм ПЭ80, подвергающейся расчетному давлению 1 МПа (10 бар). Расчетный коэффициент безопасности = 1,6.

Решение:

Толщина стенки s находится из формулы (2.3-5). σ берется из таблицы 2.1.2.

$$s = \frac{1 \cdot 0,2}{(2 \cdot 5 + 1)} \text{ м} = 0,0182 \text{ м} = 18,2 \text{ мм}$$

Пример 2

Трубы ПЭ100 SDR17 подвергаются давлению 0,8 МПа (8 бар). Необходимо рассчитать напряжение в стенке трубы и коэффициент запаса прочности после нагрузки продолжительностью 50 лет.

Решение:

Радиальное напряжение находим из (2.3-6): $\sigma_r = \frac{0,8}{2} (17 - 1) \text{ МПа} = 6,4 \text{ МПа}$

Коэффициент запаса прочности можно найти из (2.1-1): $C = \frac{10}{6,4} = 1,56$

Пример 3

Рассчитать укорочение трубы ПЭ80 SDR11, подверженной внутреннему давлению $P = 1,25$ МПа и способной свободно передвигаться. Длина трубы 100 метров. Кратковременный модуль упругости 800 МПа и коэффициент Пуассона 0,43.

Решение:

Задача решается применением формулы (2.3-11): $\Delta L = \frac{-0,43 \cdot 100 \cdot 1,25}{2 \cdot 800} (11 - 1) \text{ м} = -0,336 \text{ м}$

Пример 4

Рассчитать максимальное продольное напряжение для данных, приведенных в примере 3.

Решение:

Используя формулу (2.3-13): $\sigma_{\text{Imax}} = \frac{0,43 \cdot 1,25}{2} (11 - 1) \text{ МПа} = 2,7 \text{ МПа}$

Пример 5

Найдите долгосрочное напряжение в продольном направлении для зафиксированной трубы, подверженной постоянному давлению 1 МПа. SDR=11, кратковременный модуль $E = 800$ МПа, долговременный модуль $E = 200$ МПа и $\nu = 0,43$.

Решение:

Сначала определяется напряжение из (2.3-13): $\sigma_1 = \frac{0,43 \cdot 1}{2} (11 - 1) \text{ МПа} = 2,15 \text{ МПа}$

Соответствующее напряжение из (2.3-14): $\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{2,15}{800} \cdot 100\% = 0,27\%$

Долгосрочное напряжение для этого фиктивного постоянного натяжения также может быть найдено из (2.3-14): $\sigma_{1, \text{longterm}} = 200 \cdot 0,0027 \text{ МПа} = 0,54 \text{ МПа}$

Долгосрочное напряжение это $\frac{0,54}{2,15} \cdot 100\% = 21,6\%$ от краткосрочного напряжения в продольном направлении. Релаксация значительна.

По сравнению с радиальным напряжением, которое является постоянным в течение долгого времени, напряжение в продольном направлении достигает приблизительно $\frac{0,54}{5} \cdot 100\% = 10,8\%$ после 50 лет работы.

Пример 6

Рассчитать величину давления потери устойчивости $P_{п.у.}$ для безопорных труб $\varnothing 900$ мм, ПЭ100, SDR26 подвергающихся резкому перепаду давления. Кратковременный модуль $E = 1050$ МПа. Принимаем овализацию 1%, а $\nu = 0,43$.

Решение:

При помощи формулы (2.3-16) и рисунка 2.3.2.1:

$$P_{п.у.} = \frac{2 \cdot 1050}{1 - 0,43^2} \cdot \frac{0,65}{(26 - 1)^3} \text{ МПа} = 0,107 \text{ МПа} = 11 \text{ м вод. ст.}$$

На практике это означает, что труба в течение короткого периода времени может выдержать полный вакуум.

Однако, обычно для таких расчётов вводится запас прочности $F = 2,0$.

Не рекомендуется подвергать трубы разрежению больше чем:

$$\frac{P_{п.у.}}{F} = \frac{11}{2} \text{ м вод. ст.} = 5,5 \text{ м вод. ст.}$$

Пример 7

Вычислите коэффициент безопасности в отношении потери устойчивости для безопорной трубы ПЭ100, SDR26 используемой в качестве впускного трубопровода. Трубопровод подвергается постоянному разрежению величиной 4 м вод. ст. в самой критической точке. Долгосрочный модуль $E=200$ МПа. Овальзация составляет 1% и $\nu = 0,43$.

Решение:

Используя формулу (2.3-16) и рисунок 2.3.2.1 получаем:

$$P_{п.у.} = \frac{2 \cdot 200}{1 - 0,43^2} \cdot \frac{0,65}{(26 - 1)^3} \text{ МПа} = 0,0204 \text{ МПа} = 2 \text{ м вод. ст.}$$

$$\text{Коэффициент безопасности: } F = \frac{P_{п.у.}}{P_{возн}} = \frac{2}{4} = 0,5$$

Труба потеряет устойчивость из-за пониженного давления ещё до достижения 50-летнего срока службы.

Теоретически это произойдёт, когда модуль E будет равен 400 МПа. Это произойдет уже после 1-2 лет работы.

Пример 8

Труба, описанная в примере 7, оснащена бетонными пригрузами с шириной пролета между ними до 5,4 метра. Ширина блоков 0,4 метра и диаметр трубы $\varnothing 630$ мм. Необходимо вычислить коэффициент безопасности в отношении потери устойчивости.

Решение:

$$\text{Толщина стенок равна: } s = \frac{630}{26} \text{ мм} = 24,2 \text{ мм}$$

$$\text{Расстояние между опорами: } l = (5,4 - 0,4) \text{ м} = 5 \text{ м}$$

Давление потери устойчивости для безопорной трубы, при $k = 1,0$ по формуле (2.3-16):

$$P_{п.у.} = \frac{2 \cdot 200}{1 - 0,43^2} \cdot \frac{1}{(26 - 1)^3} \text{ МПа} = 0,0314 \text{ МПа} \approx 3,1 \text{ мвод. ст.}$$

Применим формулу (2.3-18) с $F = 1,0$:

$$P_y = \frac{2,2 \cdot 24,2 \cdot \sqrt{200}}{5000} \cdot \sqrt{0,0314} \cdot 0,65 \text{ МПа} = 0,017 \text{ МПа} \approx 1,7 \text{ мвод. ст.}$$

$$\text{Коэффициент безопасности в отношении потери устойчивости: } F = \frac{1,7}{2,0} = 0,85.$$

Видно, что коэффициент безопасности увеличился с 0,5 до 0,85, но труба все еще может потерять устойчивость.

Потеря устойчивости произойдет, когда модуль ползучести E будет приблизительно равен 275 МПа. Это произойдет приблизительно после 10 лет эксплуатации.

Чтобы достигнуть коэффициента безопасности 2,0 в этом конкретном случае, можно рассмотреть следующие варианты решения:

- уменьшение расстояния между бетонными пригрузами;
- опоры в виде стальных колец;
- установка трубы в траншею;
- увеличение диаметра трубы, чтобы уменьшить потери давления, вызванные трением;
- увеличение толщины стенок, чтобы улучшить устойчивость к продольному изгибу.

Выбор варианта решения проблем следует основывать на технической или экономической оценке. Для более детальных расчетов см. [12].

Пример 9

Необходимо установить трубу из примеров 7 и 8 в траншею на глубину 1 м. Найдите коэффициент безопасности в отношении потери устойчивости в данном случае. Кратковременный модуль для труб из ПЭ100 $E = 1050$ МПа, $\frac{\delta}{D} = 0,05$, $\gamma = 20$ кН/м³ и степень уплотнения по Проктору для почвы = 80%.

Решение:

Сначала определяется кольцевая жесткость по (2.3-21): $S_R = \frac{1050 \cdot 1000}{12 \cdot (26-1)^3}$ кПа = 5,33 кПа

Поправочный коэффициент α из-за овализации взят от (2.3-20): $\alpha = 1 - 3 \cdot 0,05 = 0,85$

E_s^1 находим из рисунка 2.3.2.2: $E_s^1 = 600$ кПа $\Rightarrow E_t^1 = 2 \cdot 600$ кПа = 1200 кПа

Используя формулу (2.3-19) и принимая $F = 1,0$ получаем давление потери устойчивости:

$$q = \frac{5,63}{1} \cdot \sqrt{5,33 \cdot 1200 \cdot 0,85} \text{ кПа} = 382 \text{ кПа} = 0,382 \text{ МПа} = 38 \text{ м вод. ст.}$$

Труба может выдержать внешнее давление соответствующее примерно 38 м вод. ст.

По сравнению с примером 7 и 8, здесь возникает внешнее давление почвы, см. формулу (2.3-22):

$$q_s = (20 - 10) \cdot 1 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2} = 10 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2} = 0,01 \text{ МПа} \approx 1 \text{ м вод. ст.}$$

Полное внешнее давление:

$$q_s = \text{разрежение} + \text{давление почвы} = (4 \text{ м вод. ст.} + 1 \text{ м вод. ст.}) = 5 \text{ м вод. ст.}$$

Коэффициент безопасности в отношении потери устойчивости: $F = \frac{q}{q_s} = \frac{38}{5} = 7,6$

Устанавливая трубу в траншею с последующей засыпкой грунтом, коэффициент безопасности увеличился в ≈ 9 раз.

Это указывает на то, что трубы, имеющие большой SDR и подверженные существенным внешним нагрузкам, следует прокладывать в траншее.

Относительно подводных трубопроводов, экономически выгоднее может быть понижение SDR по сравнению с монтажом труб в траншее.

Пример 10

Определить величину гидроудара для трубы ПЭ100 SDR17,6, если изменения в скорости воды = 0,15 м/с (снижение).

Решение:

Из таблицы 2.3.3 получаем: $c = 278$ м/с.

Используя формулу (2.3-23): $\Delta p = \frac{-0,15 \cdot 278}{9,81} = -4,25$ м вод. ст. = $-0,433$ атм.

Давление является недостаточным.

Чтобы проверить риск потери устойчивости трубы, этот результат должен быть добавлен к другим внешним нагрузкам.

Принимая необходимое время для закрытия клапана в пределах 1-2 минут (при условии нормального функционирования), максимальный скачок давления должен быть в пределах:

$p_{\max} = 10 - 15$ % от величины давления PN (атм).

Пример 11

На сколько укоротится полиэтиленовая труба, если она установлена в морской воде при 4 °С, а изначально при 20 °С она имела длину 3000 м?

Решение:

Применим формулу (2.3-26) и получаем: $\Delta L = 0,22 \cdot 10^{-3} \cdot 3000 \cdot (4 - 20)$ м = $-10,56$ м

Пример 12

Подводный трубопровод установлен зимой, когда температура морской воды составляет 4 °С. Летом температура может достигать 20 °С. Труба ПЭ100 Ø 315 мм SDR11 и может считаться полностью закрепленной бетонными пригрузами. Рассчитать напряжение, вызванное изменением температуры в первое лето, предполагая, что $E = 500$ МПа. Что произойдет после 50 лет.

Решение:

$$\text{По формуле (2.3-27): } \sigma_T = -500 \cdot 0,22 \cdot 10^{-3} \cdot (20 - 4) \text{ МПа} = -1,76 \text{ МПа}$$

Будет происходить напряжение сжатия, так как величина напряжения отрицательна. После 50 лет модуль E уменьшается до 200 МПа, см. таблицу 2.1.2. Следовательно:

$$\sigma_{T,50} = -200 \cdot 0,22 \cdot 10^{-3} \cdot (20 - 4) \text{ МПа} = -0,704 \text{ МПа.}$$

Пример 13

Рассчитать максимальное напряжение в радиальном направлении, если температура воды внутри трубы составляет 20 °С, а температура окружающей воды 4 °С? Пусть E = 800 МПа и $\alpha = 0,22 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Решение:

$$\text{Применяя формулу (2.3-28): } \sigma_T = \frac{800 \cdot 0,22 \cdot 10^{-3} \cdot (4 - 20)}{2} \text{ МПа} = -1,41 \text{ МПа}$$

В данном случае напряжение носит характер сжимающего.

Пример 14

Оценить максимальное напряжение изгиба ПЭ100 трубы Ø 1200 мм, изогнутой до радиуса $30 \cdot D$ во время погружения. Модуль E = 1050 МПа.

Решение:

$$\text{Сначала определяется радиус изгиба: } R = 30 \cdot 1,2 \text{ м} = 36 \text{ м}$$

$$\text{Напряжение по формуле (2.3-32): } \sigma_a = 1050 \cdot \frac{1,2}{2 \cdot 36} = 17,5 \text{ МПа}$$

Если вернуться назад к рисунку 2.1.2, можно найти разрушающее напряжение для кратковременной нагрузки в ≈ 15 МПа.

$$\text{Коэффициент безопасности в отношении излома } F = \frac{15}{17,5} = 0,85$$

Следовательно, должен быть выбран больший радиус изгиба.

Для практических целей радиус изгиба в $35 \cdot D$ может рассматриваться как минимальный радиус для полиэтиленовой трубы во время погружения ($\text{SDR} < 26$).

Как видно из примера, напряжения изгиба могут быть значительными.

Пример 15

Составить таблицу отображающую отношение допустимого изгиба (R/D) для классов SDR 33, 26, 22, 17, 11 и 9, принимая коэффициент безопасности равным 1,5.

Решение:

Используя формулу (2.3-39) получаем таблицу:

Класс SDR	Отношение допустимого изгиба $\frac{R}{D}$ при $F = 1,5$
33	39
26	30
21	24
17	20
13	15
11	12
9	11

Пример 16

Определить отношение допустимого изгиба (R/D) для трубы SDR26, если она подвергается внутреннему давлению в 1 бар во время погружения. Пусть коэффициент безопасности будет 1,5.

Решение:

Из таблицы 2.3.5.1 принимается отношение изгиба без внутреннего давления = 30.

Поскольку отношение изгиба обратно пропорционально допустимой деформации (см. формулу (2.3-37) и (2.3-38)), получаем с помощью рисунка 2.3.5.1:

$$K = 1,21 \qquad a_{p=1\text{бар}} = \frac{30}{1,21} = 25$$

Показатель изгиба снизился с 30 до 25.

Если труба была бы диаметром 1000 мм, радиус изгиба был бы снижен с 30 метров до 25 метров.

Пример 17

Приблизительно оценить величину сил течения и воздействия волн, считая общую максимальную скорость равной 3 м/с, а коэффициент $C = 1,0$. Диаметр трубы составляет 1,0 м и $\rho = 1025 \text{ кг/м}^3$

Решение:

$$\text{Применяя формулу (2.3-40):} \quad f = 1 \cdot 1 \cdot 1025 \cdot \frac{3^2}{2} \text{ Н/м} = 4612 \text{ Н/м} = 4,6 \text{ кН/м}$$

Это указывает на то, что эти силы могут быть значительными и должны быть приняты во внимание при выборе коэффициента безопасности для проекта.

Если труба была бы классом SDR21, то единица массы составляет $145,9 \text{ кг/м} \approx 1,46 \text{ кН/м}$ в воздухе.

Силы течения и воздействия волн в данном случае примерно в 3,15 раза больше удельного веса трубы.

Для высоких классов SDR это соотношение может быть около 6, а для низких SDR может достигать примерно 2,5.

Следует подчеркнуть, что приведенный выше пример только указание максимальной величины силы течения и воздействия волн. Для надлежащего проектирования рекомендуется проводить полные комплексные расчеты. Также стоит отметить, что силы воздействия волн значительно сокращаются по мере увеличения глубины.

Если принять процент нагрузки равным 30% от перемещения, то величина нагрузки на единицу длины от бетонного пригруза составит $2,4 \text{ кН/м}$. Это примерно 50% от сил течения и воздействия волн.

Однако составляющая течения на подвешенный трубопровод в основном будет действовать в горизонтальном направлении, а бетонные пригрузы будут действовать в вертикальном направлении.

Составляющая волн будет действовать во всех направлениях, где она присутствует.

Если предположить, что составляющая волны будет $2/3$, а составляющая течения будет $1/3$, то мы получим максимальное усилие, включая бетонные пригрузы:

$$f_{\max} = \sqrt{(4,6 \cdot 1/3)^2 + (0,5 \cdot 4,6 + 4,6 \cdot 2/3)^2} \text{ кН/м} = 5,6 \text{ кН/м}$$

Если подставить этот результат в формулу (2.3-41), то максимальное напряжение равно $0,73 \text{ МПа}$ для пролета 10 метров.

Принимая напряжение в продольном направлении, например, равным 2 МПа , максимальный пролёт в этом случае можно найти:

$$l_{\max} = \frac{2}{0,73} \cdot 10 \text{ м} = 27 \text{ м}$$

Этот пример показывает, что очень важно уделять внимание нахождению оптимальной траектории и местоположению подводных трубопроводов.

Пример 18

Труба $\varnothing 1000 \text{ мм}$ ПЭ100 SDR17 укладывается на камень таким образом, что с каждой стороны висят 2 бетонных пригруза. Вес в воде для каждого бетонного пригруза 14 кН . Рассчитайте максимальное напряжение в стенке трубы из-за сосредоточенной нагрузки.

Решение:

$$\text{Сначала найдем толщину стенки: } s = \frac{1000}{17} \text{ мм} = 58,8 \text{ мм}$$

Применим формулу (2.3-42), учитывая, что два пригруза способствуют сосредоточенной нагрузке, и получаем:

$$\sigma_{\text{кон}} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 14 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,0588^2} \text{МПа} = 3,9 \text{ МПа}$$

Как видно, это напряжение значительно и может сократить срок службы труб.

Трубопровод должен быть перемещен в сторону на лучше местоположение или должен быть подложен защитный материал, с достаточной толщиной, между трубопроводом и камнем.

Пример 19

Рассчитать эквивалентное напряжение для ситуации, когда общее напряжение в радиальном направлении $\sigma_r = 4$ МПа, а в осевом направлении $\sigma_o = -2,5$ МПа (сжатие) для трубы из ПЭ80.

Решение:

Применим формулу (2.3-45): $\sigma_{\text{эkv}} = \sqrt{4^2 + (-2,5)^2 - 4 \cdot (-2,5)} \text{МПа} = 5,7 \text{ МПа}$

Это эквивалентное напряжение необходимо сопоставить с допустимым напряжением для полиэтилена (см. таблицу 2.1.1)

Видно, что даже если значения σ_r и σ_o меньше, чем расчетное напряжение равное 5,0 МПа, то эквивалентное напряжение превышает 5,0 МПа.

Это мотивирует включать все соответствующие напряжения в конечный расчет, особенно при работе с низким коэффициентом безопасности (например $C = 1,25$).

Приложение 4 (справочное)

Примеры расчетов к разделу 2.4:

Пример 1

Труба Ø 500 мм ПЭ80 SDR21 нагружается бетонными пригрузами с расстоянием между центрами 5 м. Вес бетонного пригруза на воздухе составляет 5,6 кН. Вес трубы на воздухе составляет 0,365 кН/м. $\rho_{\text{ПЭ}} = 950 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\text{в}} = 1025 \text{ кг/м}^3$ и $\rho_{\text{б}} = 2400 \text{ кг/м}^3$. Рассчитать степень заполнения воздухом a_a .

Решение:

Сначала с помощью (2.4-3) находится вес бетонного пригруза и трубы в воде:

$$w_{\text{cw}} = 5,6 \cdot \frac{2400 - 1025}{2400} \text{ кН} = 3,2 \text{ кН} \quad (\text{отрезок трубы})$$

$$w_{\text{cw}} = \frac{3,2}{5} \text{ кН/м} = 0,64 \text{ кН/м} \quad (\text{метр трубы})$$

$$w_{\text{pipe w}} = 0,365 \cdot \frac{950 - 1025}{950} \text{ кН/м} = -0,029 \text{ кН/м}$$

Внутренний диаметр трубы:

$$d = \left(500 - \frac{2 \cdot 500}{21} \right) \text{ мм} = 452,4 \text{ мм}$$

Применим формулу (2.4-2) для расчета степени заполнения воздухом:

$$a_a = \frac{(0,64 - 0,029) \cdot 10^3 \cdot 100}{3,14 \cdot \frac{0,4524^2}{4} \cdot 1025 \cdot 9,81} \% = 37,8\%$$

Соответствующая степень смещения может быть найдена из рисунка 2.4.1 интерполяцией данных для SDR 17,6 и SDR 26 в морской воде.

Это дает: $a_d \approx 32\%$.

Для всех реальных ситуаций будет $a_a > a_d$

Пример 2

Труба Ø 500 мм ПЭ100 SDR21 лежит на морском дне и подвергается воздействию от волн и течений.

Тянущее усилие $F_D = 0,4 \text{ кН}$, а подъемная сила $F_L = 0,2 \text{ кН}$.

Степень заполнения воздухом оценивается как $\eta = 0,15$. На трубопроводе каждые 3 м установлены бетонные пригрузки. Бетон имеет вес 5,6 кН на воздухе.

Вес трубопровода 0,365 кН/м.

Предположим, удельный вес бетона $23,5 \text{ кН/м}^3$, удельный вес морской воды $10,05 \text{ кН/м}^3$ и удельный вес сточных вод 10 кН/м^3 .

Удельным весом воздуха/газа можно пренебречь. Определить устойчив ли трубопровод на дне.

Решение:

Для решения следует использовать формулы (2.4-4) – (2.4-10).

Сначала вычисляется вес бетонных пригрузов на метр трубопровода в морской воде по формуле (2.4-7):

$$w_{cw} = \frac{5,6}{3} \cdot \frac{23,5 - 10,05}{23,5} \text{ кН/м} = 1,068 \text{ кН/м}$$

Затем применим (2.4-8), чтобы найти вес воды внутри трубы на 1 м:

$$w_w = (1 - 0,15) \cdot \frac{\pi \cdot 0,4524^2}{4} \cdot \frac{10 \text{ кН}}{\text{м}} = 1,366 \text{ кН/м}$$

Плавучесть получаем из формулы (2.4-10):

$$F_B = \frac{\pi \cdot 0,5^2}{4} \cdot 10,05 \text{ кН/м} = 1,972 \text{ кН/м}$$

Нормальную силу F_N находим, подставляя значения в (2.4-4):

$$F_N = (1,068 + 1,366 + 0,365 + 0 - 1,972 - 0,2) \text{ кН} = 0,627 \text{ кН}$$

Минимальный коэффициент трения рассчитывается по (2.4-6):

$$\mu_{\min} = \frac{0,4}{0,627} = 0,64$$

Чтобы избежать скольжение трубы, коэффициент трения между бетонными пригрузами и морским дном должен быть больше 0,64.

Если вернуться к таблице 2.4.2, то можно сделать вывод, что только звездообразные пригрузки подходят для этого коэффициента.

Очевидно, что труба устойчива только при использовании бетонных пригрузов, имеющих звездообразную форму.

Иначе она будет скользить в сторону.

Чтобы получить стабильность трубы с использованием прямоугольных или круглых пригрузов, необходимо увеличить их вес до 6,5 кН и 9,3 кН соответственно.

Кроме того, можно отрегулировать расстояние между центрами до 2,58 м и 1,8 м и оставить первоначальный вес. Соответствующая степень заполнения воздухом определяется формулой (2.4-2):

$$\text{Звездообразный пригруз: } a_a = \frac{1,068 - 0,027}{\frac{\pi \cdot 0,4524^2}{4} \cdot 10} \cdot 100\% = 64,2\%$$

Прямоугольный пригруз: $a_a = \frac{1,241 - 0,027}{\pi \cdot \frac{0,4524^2}{4} \cdot 10} \cdot 100\% = 75,6\%$

Круглый пригруз: $a_a = \frac{1,774 - 0,027}{\pi \cdot \frac{0,4524^2}{4} \cdot 10} \cdot 100\% = 108,7\%$

Пример 3

Самотёчная канализация Ø 500 мм SDR21 PE80 проектируется как водоотводящий трубопровод в озеро. На трассе существует высокая точка. Можно пренебречь силами течений и волны.

Определить проектную степень заполнения воздухом.

Решение:

Идем последовательно по пунктам I), II), III), IV) и V):

I) $a_{aI} = 2,5\%$ (Принимаем наивысшее значение, которое подсчитывается в конечном итоге);

II) Используем таблицу 2.4.4 используя входные данные:

- канализация;
- большие перепады высот:

$$\Rightarrow a_{aII} = 50\%;$$

III)

IV) Не дают дополнительных значений.

V)

Общий результат: $a_a = 52,5\%$.

Следует подчеркнуть, что эта степень заполнения воздухом применима только для области с большими перепадами высот.

Пример 4

Течение воздействует на трубопровод под углом 45° от осевой линии, как показано на схеме.

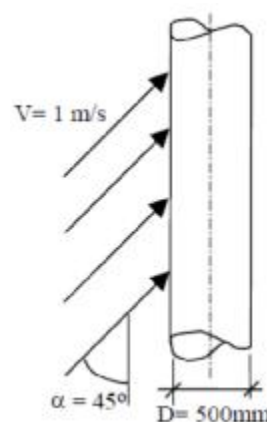
Диаметр трубы составляет 500 мм.

Плотность воды составляет 1000 кг/м³.

Предположим, что $C_L = 0,20$ и $C_c = 1,0$.

Необходимо рассчитать тянущую силу и подъемную силу.

Решение:



Подставляя эти данные выражение в (2.4-15) и (2.4-16) получаем:

$$F_c = 1,0 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 1^2 \cdot \sin^2 45 \cdot 0,5 \text{ Н/м} = 125 \text{ Н}$$

$$F_L = 0,2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1000 \cdot 1^2 \cdot \sin^2 45 \cdot 0,5 \text{ Н/м} = 25 \text{ Н}$$

Видно, что значение силы значительно сокращается, если угол атаки α мал. Поэтому необходимо стараться избегать перпендикулярно направленного к трубе течения.

Наконец, следует отметить, что формулы (2.4-15) и (2.4-16) должны быть поправлены с учетом формы и площади бетонных пригрузов, если проводить более детальные расчеты. В этом случае можно ввести "коэффициент заслона" k . Обычно k будет находиться в диапазоне 1,0-1,5.

Это означает, что силы, рассчитываемые в примере 4, могут быть на 50% выше, если учитываются бетонные пригрузки, в зависимости от формы, размеров и расстояния между центрами.

Пример 5

Необходимо найти высоту волны H_0 и длину волны L_0 на глубоководье для скорости ветра $V = 30$ м/с (сильный шторм) и протяженности области образования волн $F = 10$ км.

Применить как метод с диаграммами, так и метод с формулами.

Сравнить результаты. Определить на какой глубине волна будет угасать.

Решение:

а) Используя статистику ветра:

Сначала определяется скорость ветра в милях в час и протяженность области образования волн в милях.

$$V = 30 \text{ м/с} = \frac{30 \cdot 60 \cdot 60}{1609} \text{ миль/час} = 67 \text{ миль/час}$$

$$F = 10 \text{ км} = \frac{10000}{1609} \text{ миль} = 6,2 \text{ миль}$$

Используя диаграммы на рисунке 2.4.6.2 и рисунке 2.4.6.3 получаем:

$$H_{1/3} = 7 \text{ футов} = 2,1 \text{ м} \qquad T_{1/3} = 5,3 \text{ с}$$

Максимальная высота волны определяется формулой (2.4-20):

$$H_0 = 1,8 \cdot 2,1 \text{ м} = 3,8 \text{ м}$$

Длина волны может быть рассчитана по формуле (2.4-24):

$$L_0 = 1,56 \cdot 5,3^2 \text{ м} = 44 \text{ м}$$

б) Используя формулы (2.4-22) и (2.4-23):

$$H_0 = 0,045 \cdot 30 \cdot \sqrt{10\text{м}} = 4,2 \text{ м}$$

$$L_0 = 0,56 \cdot 30 \cdot \sqrt{10\text{м}} = 53 \text{ м}$$

в) Сравнение результатов:

Если сравнить результаты а) и б), то получается, что метод с применением формул дает более высокие значения, чем метод с применением статистики ветра.

Различия, выраженные в процентах:

$$\text{Высота волны} \quad \frac{4,2-3,8}{3,8} \cdot 100\% = 10\%$$

$$\text{Длина волны} \quad \frac{53-44}{44} \cdot 100\% = 20\%$$

г) Глубина угасания:

Формула (2.4-26) дает оценку глубины угасания:

$$\text{а)} \Rightarrow h_y = 0,05 \cdot 44 \text{ м} = 2,2 \text{ м};$$

$$\text{б)} \Rightarrow h_y = 0,05 \cdot 53 \text{ м} = 2,6 \text{ м}.$$

Трубопровод должен быть погружён на глубину как минимум равной глубине угасания.

Как правило, следует погружать трубу на глубину, равную максимальной высоте волны H .

В примере 5 эта рекомендация приводит к расположению траншеи на глубине около 4 метров.

Пример 6

Рассмотрим данные о волне, рассчитанные методом использования статистики ветра в примере 5 ($H_0 = 3,8 \text{ м}$, $L_0 = 44 \text{ м}$).

На схеме ниже показано, что направление скорости волны попадает на перпендикуляр к интервалам между горизонталями под углом $\alpha_0 = 45^\circ$.

Водоотводящий полиэтиленовый трубопровод диаметром 500 мм установлен перпендикулярно горизонталям, это означает $\beta = 0^\circ$.

Трубопровод расположен на глубине 5 м.

Найдите коэффициент преломления f и рассчитайте силы, действующие на трубопровод на глубине 17,5 метров.

Предположительно трубопровод укладывается непосредственно на морском дне (без зазора между трубой и дном).

Пусть $\gamma = 10000 \text{ Н/м}^3$.



Водоотводящий трубопровод, подвергающийся воздействию волн

Решение:

Используя рисунок 2.4.6.4, $\alpha = 45^\circ$, $\frac{h}{L_0} = \frac{17,5}{44} = 0,4$

Это дает коэффициент преломления: $f = 0,1$

Максимальные значения сил волн могут быть найдены по формулам (2.4-17), (2.4-18) и (2.4-19).

Коэффициенты силы взяты из таблицы 2.4.6.1.

Сила инерции: $F_i = \pi \cdot 3,3 \cdot 0,1 \cdot 10000 \cdot \frac{\pi \cdot 0,5^2}{4} \cdot \frac{3,8}{44} \text{ Н/м} = 175,6 \text{ Н/м}$

Сила сопротивления: $F_D = 1 \cdot 0,1^2 \cdot 10000 \cdot \frac{\pi \cdot 0,5^2}{4} \cdot \frac{3,8}{44} \cdot \frac{3,8}{0,5} \text{ Н/м} = 12,88 \text{ Н/м}$

Подъемная сила: $F_L = 2 \cdot 0,1^2 \cdot 10000 \cdot \frac{\pi \cdot 0,5^2}{4} \cdot \frac{3,8}{44} \cdot \frac{3,8}{0,5} \text{ Н/м} = 25,76 \text{ Н/м}$

Из результатов видно, что сила инерции является доминирующей силой. Она не совпадает по направлению с подъемной силой и силой сопротивления.

Для устойчивости расчетов можно считать F_D равным нулю при $F_i = F_{i,\max}$ и наоборот.

Таким образом, получается следующая комбинация:

Горизонталь 176 Н

Вертикаль 26 Н

Приложение 5 (справочное)

Примеры расчетов к разделу 2.5:

Пример 1

Рассчитать баланс внутреннего давления для трубопровода \varnothing 500 мм ПЭ80 SDR21, который имеет степень нагрузки бетонными пригрузами соответствующей степени заполнения воздухом $a_a = 30\%$.

Предполагаемые глубины 10 м, 20 м и 30 м.

Решение:

Применяя формулу (2.5-1):

$$P_{10\text{м}} = 0,3 \cdot 10 \text{ м} = 3 \text{ м водн. ст.} = 0,29 \text{ бар}$$

$$P_{20\text{м}} = 0,3 \cdot 20 \text{ м} = 6 \text{ м водн. ст.} = 0,59 \text{ бар}$$

$$P_{30\text{м}} = 0,3 \cdot 30 \text{ м} = 9 \text{ м водн. ст.} = 0,88 \text{ бар}$$

Стоит обратить внимание, что внутреннее давление не зависит от диаметра трубы.

Пример 2

Трубопровод \varnothing 500 мм ПЭ80 SDR26. Труба должна быть установлена на глубину 50 метров. Степень нагрузки трубопровода соответствует 25% заполнению воздухом. Погружение проводится с использованием коэффициента безопасности в отношении продольного изгиба равного 2,0. Плотность морской воды может быть принята равной 1025 кг/м^3 .

Найдите следующие параметры:

- минимальный радиус изгиба;
- необходимое тяговое усилие в конце трубы;
- максимальное напряжение в стенке трубы;
- угол α , в критической точке S-образной кривой.

Решение:

- Отношение минимального изгиба берётся из таблицы 2.3.5.1:

$$\text{SDR} = 26 \Rightarrow \frac{D}{R} = 30R_{\text{min}} = 30 \cdot 0,5 \text{ м} = 15 \text{ м};$$

- Чтобы найти тяговое усилие необходимо знать, w_1 и w_2 .

Применяя формулу (2.4-2) для определения w_1 : ($w_1 = w_{\text{cw}} + w_{\text{pipe w}}$)

$$w_1 = a_a \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot \gamma_w \quad w_1 = 0,25 \cdot \pi \cdot \frac{0,4618^2}{4} \cdot 1025 \cdot 9,81 \text{ Н/м} = 420 \text{ Н}$$

$$w_2 \text{ можно найти из (2.5-8):} \quad w_2 = 420 \cdot \frac{1-0,25}{0,25} \text{ Н} = 1260 \text{ Н}$$

Максимальное тяговое усилие

$$\text{из формулы (2.5-10):} \quad P = 1260 \cdot 17 \text{ Н} = 21,4 \text{ кН};$$

в) Максимальная сила натяжения в трубопроводе возникнет в критической точке.

По формуле (2.5-6):

$$T = P + w_1(1 - a_a) \cdot H \quad T = (21400 + 420(1 - 0,25) \cdot 50)\text{Н} = 37,2 \text{ кН}$$

Соответствующее напряжение в стенке трубы может быть найдено:

$$\sigma = \frac{T}{\frac{\pi}{4} \cdot (D^2 - d^2)} = \frac{37200}{\frac{\pi}{4} \cdot (0,5^2 - 0,4618^2)} \text{ Н/м}^2 = 1,3 \text{ МПа}$$

Кроме того будет напряжение в продольном направлении из-за внутреннего давления и коэффициента Пуассона, см. 2.3.1.2. Формула (2.3-13):

$$\sigma_{\text{imax}} = \frac{0,43 \cdot 0,125}{2} \cdot (26 - 1)\text{МПа} = 0,67 \text{ МПа}$$

Максимальным растягивающим напряжением является сумма σ и σ_{imax} :

$$\sigma_{\text{max}} = (1,3 + 0,78) \text{ МПа} = 1,97 \text{ МПа}$$

Из таблицы 2.1.2 можно увидеть, что расчетное кратковременное напряжение составляет $8 \cdot 1,6 \text{ МПа} = 12,8 \text{ МПа}$ для ПЭ80.

Коэффициент безопасности в отношении растягивающего напряжения становится:

$$C = \frac{12,8}{1,97} = 6,49$$

Этот результат подчеркивает, что потеря устойчивости является наиболее критическим ущербом, который может произойти во время погружения ($C = 2,0$);

г) Угол α , в критической точке определяется формулой (2.5-7):

$$\cos \alpha = \frac{21400}{21400 + 420 \cdot (1 - 0,25) \cdot 50} = 0,58 \quad \alpha = 54^\circ$$

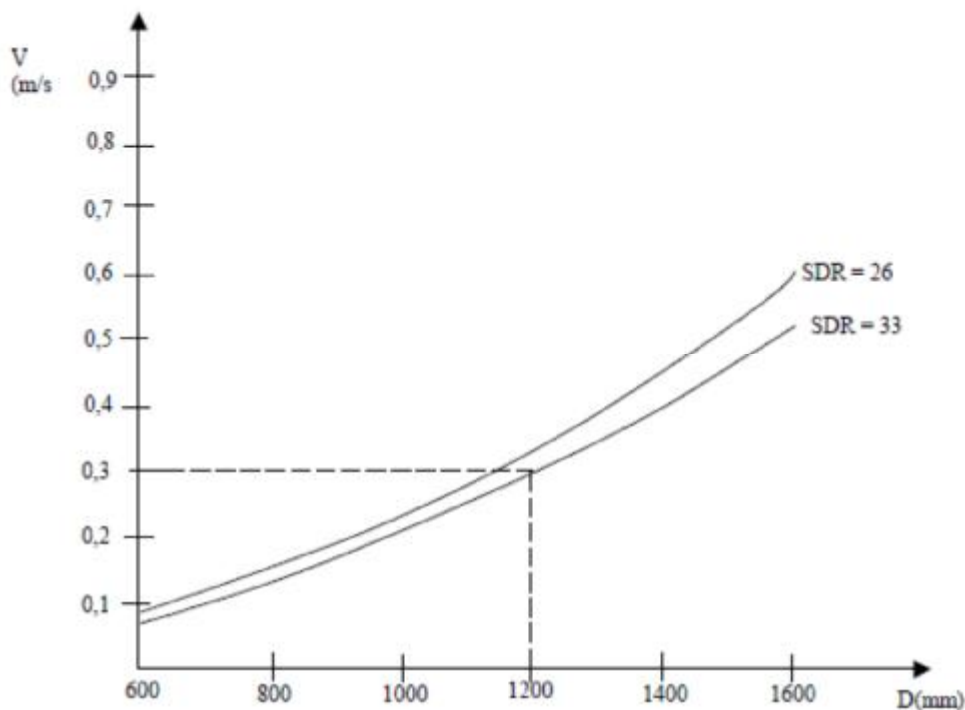
Как показано в примере 2, можно вычислить тяговое усилие P для обеспечения безопасной установки в сочетании с внутренним давлением.

Пример 3

Посчитать максимальную скорость погружения для полиэтиленового трубопровода для SDR26 и 33 в зависимости от диаметра. Предположительно, максимальная глубина составляет 50 метров и $D \geq 600 \text{ мм}$.

Решение:

Используя формулу (2.5-16), можно отобразить результат графически (диаграмма ниже).



Максимально допустимая скорость погружения, при которой отсутствуют колебания трубопровода

На диаграмме показано, что скорость 0,3 м/с может применяться для труб диаметром от \varnothing 1200 мм с учётом отсутствия колебаний.

Для \varnothing 1600 мм максимальная скорость погружения, при отсутствии колебаний, составляет 0,6 м/с для SDR26.

На практике скорость контролируемого погружения должна быть в диапазоне 0,1 - 0,6 м/с.

Пример 4

Предположительно, труба \varnothing 1200 мм ПЭ80 SDR26 должна быть опущена до глубины 50 метров.

Продольный разрез (профиль) дна приведен ниже, в таблице:

L (м)	H (м)	L (м)	H (м)
0	5	400	35
100	15	500	40
200	20	600	45
300	30	700	50

Целью является погружение трубы с постоянной скоростью $V = 0,3$ м/с.

Нагрузка равна степени заполнения воздухом $a_a = 30\%$.

Предположительно, входное отверстие для воды во время погружения равно 1/4 от внутреннего диаметра труб.

Рассчитать баланс давления внутри трубы и давление погружения.

Найти максимальную скорость, избегая потерю устойчивости.

Решение:

Формула (2.5-1) используется для расчета баланса избыточного давления:

$$p_b = a_a \cdot H \quad a_a = 0,3$$

Это дает:

Уравновешивающее давление

L (м)	H (м)	p_b (м водн.ст.)	L (м)	H (м)	p_b (м водн.ст.)
0	5	1,5	400	35	10,5
100	15	4,5	500	40	12,0
200	20	6,0	600	45	13,5
300	30	9,0	700	50	15,0

Для расчета внутреннего давления погружения используем формулу (2.5-17):

$$p_i = a_a \cdot H - \frac{V^2(f \cdot L + k_s \cdot D)}{2 \cdot g \cdot D}$$

Входные значения:

$$D = 1108,2 \text{ мм}$$

$$f = 0,02$$

$$k_s = 0,5 \cdot (4)^2 = 8$$

$$g = 9,81 \text{ м/с}^2$$

$$V = 0,3 \text{ м/с}$$

Результат приведен в таблице:

Внутреннее давление погружения

L (м)	H (м)	p_b (м водн.ст.)	p_i (м водн.ст.)	a_i (%)
0	5	1,5	1,46	29,2
100	15	4,5	4,46	29,8
200	20	6,0	5,95	29,8
300	30	9,0	8,94	29,8
400	35	10,5	10,43	29,8
500	40	12,0	11,92	29,8
600	45	13,5	13,42	29,8
700	50	15,0	14,91	29,8

Как видно, во время погружения существует очень малое пониженное давление (разрежение) в трубе (0,04-0,09 м водн.ст.).

Регулировать давление с достаточной точностью может быть затруднительно. Для этого необходим манометр.

В этом случае уменьшение впускной площади для воды может быть благоприятным в целях повышения k_s (коэффициент единичных потерь). Если, например, применён клапан и диаметр входа эквивалентен $1/20 \cdot D$, то падение давления добавят к 0,83 м водн.ст.

Из формулы (2.3-16) можно найти давление продольного изгиба:

$$p = \frac{2 \cdot 800}{1 - 0,4^2} \cdot \frac{0,65}{(26 - 1)^2} \text{ МПа} = 0,079 \text{ МПа} = 8,0 \text{ м водн. ст.}$$

Если ввести коэффициент безопасности 2,0, то перепад давления составит около 4,0 м водн. ст.

Подставим это значение в формулу (2.5-14) вместо $(a_a \cdot H - p_i)$ и получим:

$$V_{\max,0} = \left[\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 1,107 \cdot 4,0}{0,02 \cdot 0 + 8 \cdot 1,107} \right]^{\frac{1}{2}} \text{ м/с} = 3,13 \text{ м/с}$$

$$V_{\max,700} = \left[\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 1,107 \cdot 4,0}{0,02 \cdot 700 + 8 \cdot 1,107} \right]^{\frac{1}{2}} \text{ м/с} = 1,95 \text{ м/с}$$

Критическая скорость избегая продольный изгиб в начальной точке составляет 3,13 м/с и 1,95 м/с в конечной точке.

ОКС 75.180.10

Ключевые слова: стандарт организации, полиэтиленовая труба, соединительные детали, методика, расчет, монтаж, дюкерный переход, дюкер, водоём, подводный трубопровод