МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ
НЕФТЯНОЙ И ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ
ВНИИСТ

# РУКОВОДСТВО

## ПО ТЕХНОЛОГИИ УКЛАДКИ ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ СПОСОБОМ СВОБОДНОГО ПОГРУЖЕНИЯ С ПРИЛОЖЕНИЕМ РАСТЯГИВАЮЩЕГО УСИЛИЯ

Р 315–78

Москва 1979

gost.e-ecolog.ru

УДК 621.643.073.(083.75)(204.I)

В Руководстве рассмотрены технологические схемы укладки подводных трубопроводов способом свободного погружения в различных условиях, изложены методы укладки с приложением растягивающего усилия, приведены рекомендации по методам расчета подводных трубопроводов.

Руководство разработано лабораторией строительства подводных трубопроводов (ЛСПТ) ВНИИСТа совместно с отделом научных исследований и экспериментального проектирования (ОНИЭП) Гипроречтранса на основе обобщения и анализа отечественного и зарубежного опыта проектирования и строительства подводных трубопроводов, а также теоретических и экспериментальных исследований, выполненных ВНИИСТом и Гипроречтрансом.

Руководство предназначено для составления проектов организации строительства и проектов производства работ совместно с другими нормативными и рекомендательными документами Миннефтегазстроя, Минречфлота РСФСР, относящимся к технологии строительства подводных трубопроводов.

Руководство разработано инженерами Крупкиным Б.Н. (ВНИИСТ), Гельфером В.Я. (Гипроречтранс), Головиным Ю.А. (Подводречстрой) при участии кандидатов техн.наук Левина С.И., Герштейна М.С., Камышева М.А. (ВНИИСТ), Гольдина Э.Р. (Гипроречтранс), инж.Канаева Б.Я. (трест Союзподводгазстрой).

Замечания и предложения направлять по адресу: 105058, Москва, Окружной пр., д.19, ВНИИСТ, лаборатория строительства подводных трубопроводов.

© Всесоюзный научно-исследовательский институт по строительству магистральных трубопроводов (ВНИИСТ), 1979

## ВВЕДЕНИЕ

В практике строительства подводных трубопроводов способ укладки свободным погружением получил распространение как при сооружении речных переходов нефтепроводов, водопроводов и трубопроводов других назначений, так и при строительстве морских подводных нефтегазопроводов.

В ряде случаев этот способ укладки является наиболее экономичным по сравнению с другими способами укладки, а иногда практически единственно возможным. Например, когда нельзя укладывать трубопровод способом протаскивания из-за невозможности устроить строительно-монтажную площадку в створе перехода для подготовки плетей трубопровода или когда трубопровод запроектирован с криволинейными отводами в вертикальной плоскости.

Область применения способа укладки свободным погружением ограничивается допустимой глубиной укладки, определяемой максимальными напряжениями, возникающими в трубопроводе при его укладке.

Однако область применения указанного способа может быть расширена с увеличением допускаемой глубины укладки за счет использования специальных методов, позволяющих уменьшить изгибные напряжения в трубопроводе.

Приложение растягивающего усилия к трубопроводу в процессе погружения, а также заполнения его полости на участке изгиба легкими материалами позволяет значительно увеличить допускаемую глубину укладки трубопровода при минимальных дополнительных затратах.

| Внесено ЛСПТ | Утверждено ВНИИСТом 7 июля 1978 г. | Разработано впервые |
|---|---|---|

В настоящем Руководстве:

приведена технология укладки подводных трубопроводов способом свободного погружения с заполнением водой трубопровода и с применением понтонов;

даны технологические схемы укладки трубопровода с натяжением его в процессе погружения и с заполнением его полости "легкими" материалами.

изложены схемы производства работ в зимних условиях;

приведены рекомендации по методам расчета подводных трубопроводов при их укладке;

дана классификация способов погружения трубопроводов и указана область их применения.

Изложенные в Руководстве технологические схемы погружения трубопроводов с помощью залива воды, применения понтонов и предварительной балластировки составлены на основе изучения и анализа опыта проектирования и строительства подводных трубопроводов организациями Миннефтегазстроя и Минречфлота РСФСР.

Технологические схемы укладки подводных трубопроводов способом свободного погружения на большие глубины с приложением растягивающего усилия, а также с заполнением полости трубопровода "легкими" материалами и методы их расчета разработаны на основе теоретических и экспериментальных исследований, проведенных институтами ВНИИСТ, Гипроречтранс и Управлением Подводречстрой (3-й экспедиционный отряд).

## I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.I. Настоящее Руководство разработано в развитие глав СНиП по строительству и проектированию магистральных трубопроводов и распространяются на проектирование и строительство подводных трубопроводов, сооружаемых на внутренних водоемах и морских акваториях.

I.2. Под укладкой трубопровода способом свободного погружения подразумевается способ его укладки на дно водной преграды, при котором смонтированный трубопровод, расположенный на поверхности акватории, под действием перемещающейся распределенной нагрузки опускается на дно с изгибом в вертикальной плоскости.

I.3. Укладка трубопроводов способом свободного погружения может быть рекомендована при технико-экономическом обосновании его преимуществ по сравнению с другими способами укладки.

I.4. При укладке подводных трубопроводов способом свободного погружения могут быть применены различные технологические схемы, выбор которых осуществляют в зависимости от следующих факторов:

гидроморфологических, топографических и климатических условий в районе прокладки (ширины и глубины водной преграды, режима уровней и режима скоростей течения, ледовых условий, рельефа дна и берегов);

назначения и конструкции подводного трубопровода (характера транспортируемого продукта, диаметра трубы, наличия балластных грузов и их конструктивного исполнения, радиусов вертикальной трассировки трубопроводов);

наличия судоходства, его интенсивности и возможности прекращения движения судов на время, необходимое для заводки, установки и погружения трубопровода;

места расположения строительно-монтажной площадки (на участке перехода, на береговой стационарной базе, удаленной от перехода и т.п.);

технико-экономического сравнения возможных вариантов монтажа и погружения трубопровода на дно водной преграды.

I.5. Приведенные в Руководстве технологические схемы укладки подводных трубопроводов можно применять при волнении до 3 баллов (на основе имеющегося опыта строительства).

I.6. При разработке технологии укладки трубопроводов способом свободного погружения необходимо:

выбрать оптимальную технологическую схему укладки трубопровода;

выполнить проверочные расчеты напряжений, возникающих в наиболее опасных сечениях трубопровода на различных этапах его погружения;

определить (при необходимости) длину изогнутого участка упругой линии трубопровода в процессе погружения;

определить количество, мощность и расстановку технологического оборудования (буксиров, плавкранов, понтонов, тяговых лебедок, плавучих опор ), необходимого для вывода и закрепления трубопровода в заданном створе и его погружения на дно водоема.

I.7. Максимальные напряжения, которые возникают в трубопроводе в процессе укладки и определяют допустимую глубину его погружения, зависят от принятой технологической схемы укладки, конструктивных параметров трубопровода и способа его погружения.

Для уменьшения напряжений, а следовательно увеличения допускаемой глубины погружения трубопровода, возможны следующие мероприятия:

увеличение толщины стенки трубопровода;

применение труб из стали с более высокими механическими характеристиками;

уменьшение кривизны трубопровода при укладке (приложение растягивающего усилия к трубопроводу; применение понтонов; балластных покрытий; заполнение полости трубопровода "легкими" материалами).

При укладке трубопроводов большого диаметра на дно водоема возможно сочетание указанных мероприятий для более эффективного снижения напряжений.

## 2 МОНТАЖ ТРУБОПРОВОДА И ПОДГОТОВКА ЕГО К УКЛАДКЕ

2.1. В соответствии с условиями, указанными выше в п.I.4. в зависимости от периода строительства можно выделить несколько основных технологических схем монтажа подводных трубопроводов, укладываемых свободным погружением.

2.2. При укладке в навигационный период подводных трубопроводов небольшой протяженности целесообразно монтировать и устанавливать в створе перехода трубопровод проектной длины. Если условия строительства не позволяют сварить и установить в створ перехода трубопровод проектной длины, то его собирают из отдельных плетей и выполняют сварку стыков между плетями на плаву.

2.3. Морские трубопроводы значительной протяженности целесообразно монтировать из отдельных длинномерных плетей с последовательным наращиванием, буксировкой их в заданном створе и сваркой на плаву.

2.4. При строительстве речных подводных переходов технологию монтажа трубопровода, спуск его на воду со стапельных площадок, буксировку в створ трассы, установку и закрепление в створе перехода выполняют в соответствии с указаниями, приведенными в "Рекомендациях по технологии укладки подводных трубопроводов диаметром I220 и I420 мм", Р I26-72, [I].

При строительстве морских подводных трубопроводов указанные выше работы выполняют в соответствии с "Рекомендациями по технологии прокладки морских трубопроводов", Р I25-72 [2].

Погружение трубопровода на дно водоема рекомендуется выполнять по технологическим схемам, приведенным ниже в разделе 3 настоящего Руководства.

2.5. Монтаж трубопровода на плаву включает сварку стыков между плетями. При небольшом диаметре укладываемого трубопровода стыковку можно осуществлять с помощью кранового судна или баржи, оборудованной грузоподъемными средствами.

Для стыковки на плаву трубопроводов диаметром I020 мм и больше рекомендуется применять плавучие камеры, обеспечивающие стыковку плетей без их подъема (см. Рекомендации [I] ).

2.6. Технология производства работ по стыковке трубопроводов с помощью плавучей камеры заключается в следующем:

отдельную плеть трубопровода с установленными на концах заглушками опускают (скатывают) со стапеля в обводненную траншею (канал или реку в случае расположения стапеля вдоль уреза воды), подводят к месту стыковки и устанавливают в положение, предусмотренное в проекте производства работ. Затем эту плеть закрепляют с помощью плавучих средств (плавучих опор), установленных на якорях;

к концу установленной первой плети доставляют плавучую камеру, подводят в притопленном состоянии под конец трубопровода и закрепляют на нем;

вторую плеть трубопровода с установленными на концах заглушками скатывают на воду, подводят к первой плети и закрепляют на месте с помощью плавучих средств (опор) так, чтобы конец стыкуемой плети был заведен в плавучую камеру и укреплен в ней в необходимое для стыковки положение;

из балластных отсеков плавучей камеры откачивают воду (камера частично всплывает), герметизируют внутреннюю полость рабочего отсека камеры и удаляют воду из рабочего и шлюзовых отсеков;

снимают заглушки с концов стыкуемых плетей и с помощью стяжных и центрирующих устройств выполняют стыковку и прихватку труб;

проверяют надежность герметизации шлюзовых и стыковочного отсеков камеры;

сваривают стык, проверяют качество его сварки;

выполняют очистку и изоляцию стыка.

Для перемещения камеры на другой стык отсеки камеры заполняют водой, разгерметизируют стыки в местах прохода трубопроводов через поперечные переборки и торцевые стенки камеры, освобождают зажимы на трубе и буксиром передвигают камеру вдоль трубы на следующий стык.

Если концы трубопровода находятся на берегах или на дне водоема, то камеру после притапливания одного ее борта выводят из под трубопровода буксиром в направлении, перпендикулярном трубопроводу.

2.7. Для выполнения работ, связанных со стыковкой и сваркой трубопроводов на плаву с помощью плавучей камеры может быть использовано следующее оборудование:

баржа-площадка несамоходная грузоподъемностью 200 т или баржа-площадка несамоходная грузоподъемностью 300 т;

насос для водоотлива АЯП-75;

компрессор ДК-9;

электросварочные агрегаты АСБ-300 и АСДП-500Г (двухпостовой);

баллоны кислородные и ацетиленовые (по 3 каждого);

передвижная электростанция ПЭС-15А;

наружные центраторы для труб ЦЗ-1220 и ЦЗ-1420;

2.8. Монтаж и подготовку к укладке трубопроводов способом свободного погружения в зимних условиях можно выполнять по двум основным технологическим схемам.

I-я схема (рис.I) - монтаж и сварка плетей трубопровода на берегу; устройство майны на всю ширину зеркала реки или водоема; вывод трубопровода в майну с последовательной стыковкой плетей на берегу; погружение трубопровода на дно водоема одним из способов, приведенных ниже в разделе 3.

2-я схема - расчистка льда и разметка трассы по створу перехода; монтаж и сварка трубопровода на льду из звеньев, заготовленных на береговой базе; устройство майны в створе перехода параллельно смонтированному трубопроводу; спуск трубопровода в майну и укладка его на дно водоема.

При монтаже на льду трубопровод необходимо выкладывать на лежки.

2.9. Выбор схемы монтажа зависит от несущей способности ледяного покрова и конструкции трубопровода. Если по ледяному покрову возможно перемещение машин и механизмов, необходимых для монтажа трубопровода, и ледорезных машин для разработки майны, то целесообразно применять 2-ю схему, при недостаточной прочности ледяного покрова - I-ю схему.

2.10. Движение транспортных средств по льду, монтаж трубопровода, установка оборудования и размещение материалов разрешаются только после определения в натуре приведенной толщины ледяного покрова и сравнения ее с расчетной (допустимой) толщиной льда, принятой в проекте организации работ.

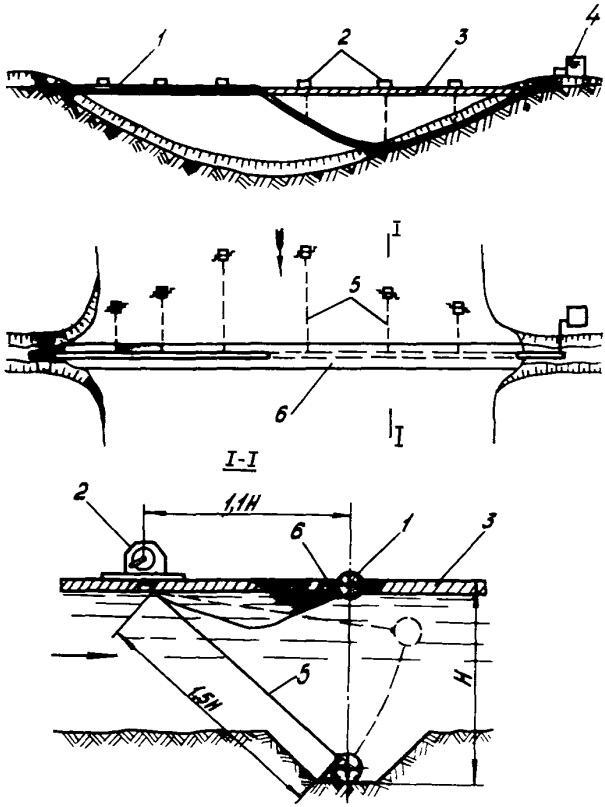


Рис.I. Схема укладки трубопровода способом свободного погружения в зимних условиях с предварительной разработкой траншеи:

I - погружаемый трубопровод; 2 - анкерные лебедки; 3 - ледяной покров; 4 - наполнительный агрегат; 5 - тросовые оттяжки; 6 - майна

Приведенную толщину льда, а также расчетную (допустимую) толщину льда, в зависимости от вида груза, его массы, расположения относительно прорези и т.п. можно определять в соответствии с "Временными указаниями по технологии и организации строительства подводных переходов магистральных трубопроводов в зимних условиях"[3].

2.II. При наличии течения трубопровод необходимо удерживать оттяжками, которые предохраняют его от сноса во время погружения.

Анкерные опоры для закрепления оттяжек устанавливают на льду выше трассы по течению. Длину тросовых оттяжек (5, см. рис.I) определяют в зависимости от глубины воды и принимают равной I,5 H (где H - глубина от поверхности льда до дна водоема, м).

Количество опор для закрепления тросовых оттяжек и расстояния между ними определяют расчетом в зависимости от скорости течения, диаметра трубопровода и его длины, как указано ниже в п.5.I3 настоящего Руководства и в Рекомендациях [I].

2.I2. Укладка трубопровода способом свободного погружения в зимних условиях со льда имеет ряд преимуществ:

расположено все оборудование, необходимое для монтажа, закрепления и погружения трубопровода не на плавучих средствах, а на льду;

исключены волновые воздействия на трубопровод и технологическое оборудование;

облегчен контроль за всеми строительными операциями при укладке;

исключено судоходство;

возможна укладка трубопровода при меньших скоростях течения.

Наиболее трудоемкими являются ледорезные работы, которые должны быть выполнены механизированным способом с применением ледорезных машин.

## 3. СПОСОБЫ ПОГРУЖЕНИЯ ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

3.I. При укладке подводных трубопроводов можно применять различные технологические схемы его погружения, основными из которых являются:

Схема I – погружение плавающего, небалластированного трубопровода путем залива в него воды;

Схема II – погружение плавающего, небалластированного трубопровода с прикрепленными к нему понтонами путем залива воды в трубопровод;

Схема III – погружение плавающего балластированного трубопровода (без закрепления к нему понтонов) путем залива в него воды;

Схема IУ – погружение предварительно заполненного водой трубопровода с прикрепленными понтонами путем открепления понтонов или залива их водой;

Схема У – погружение балластированного трубопровода с прикрепленными понтонами путем открепления понтонов или залива их водой;

Схема УI – погружение балластированного трубопровода с прикрепленными понтонами путем открепления (или залива водой) определенного (расчетного) числа понтонов;

Схема УII – погружение плавающего трубопровода с заполнением его смесью воды с "легкими" материалами (например, пенополистиролом);

При укладке подводных трубопроводов возможны различные сочетания приведенных выше технологических схем.

3.2. При погружении трубопровода по технологическим схемам I, II, III, УП скорость укладки можно определить по формуле

$$V = \frac{4Q_н}{\pi D_{вн}^2}, \qquad (I)$$

где $V$ – скорость укладки трубопровода, м/ч;

$Q_н$ – производительность насоса, $м^3/ч$;

$D_{вн}$ – внутренний диаметр трубопровода, м.

Для закачки воды в трубопровод применяют насосы производительностью 50–I50 $м^3/ч$.

Во всех случаях при укладке трубопровода методом свободного погружения должна быть предусмотрена резервная насосная установка на случай, если выйдет из строя основной насос.

До погружения начального участка трубопровода на дно (для избежания перелива воды и образования воздушных пробок) воду в трубопровод следует подавать с минимальной производительностью насоса. После того, как часть трубопровода ляжет на дно, устанавливают постоянный расход воды, который не должен превышать расхода, найденного по графику (рис.2).

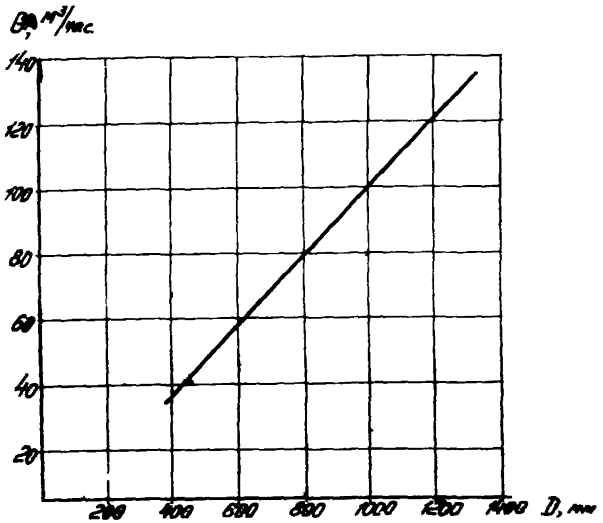


Рис.2. График зависимости между величиной допустимого расхода воды, подаваемой в погружаемый трубопровод (Q), и его диаметром (D)

3.3. Технологические схемы I-IУ, УП рекомендуется применять при погружении трубопроводов, для которых допустимо временное заполнение их водой.

Технологические схемы У и УI (без заполнения трубопровода водой ) можно рекомендовать для погружения трубопроводов, заполнение водой которых не допускается.

3.4. Технология работ при укладке трубопровода по схеме I (рис.3) заключается в следующем:

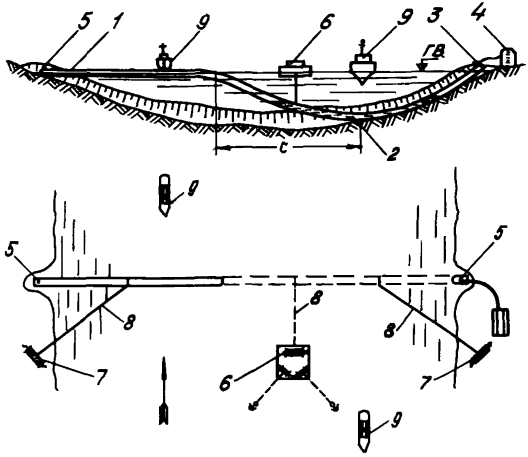


Рис.3. Схема I – погружение плавающего небалластированного трубопровода путем залива в него воды:

С – S – образный участок упругого изгиба трубопровода; I – участок трубопровода, заполненный воздухом; 2 – участок трубопровода, заполненный водой; 3 – патрубок для залива воды; 4 – насосная установка; 5 – воздушный вентиль (вантузы); 6 – плавучая опора; 7 – лебедка; 8 – тросовые оттяжки; 9 – катер

трубопровод, покрытый изоляцией и футеровкой, с приваренными по концам заглушками, на плаву заводят в створ перехода;

плавающий трубопровод закрепляют в створе при помощи плавучих опор и береговых тросовых стяжек;

трубопровод опускают на дно водной преграды путем залива в него воды через специальный патрубок, находящийся в трубопроводе воздух вытесняется водой через воздушные вентили (вантузы), расположенные на обоих концах трубопровода.

Патрубки для залива воды и выпуска воздуха устраивают в верхних точках на трубопроводе.

3.5. Технология погружения трубопровода по схеме II подобна технологии по схеме I (см.выше п.3.4); различие состоит лишь в том, что к трубопроводу на участках, на которых глубина воды превышает допустимую, закрепляют понтоны, а после укладки трубопровода на дно понтоны открепляют.

Разгружающие понтоны устанавливают на трубопроводе таким образом, чтобы вызываемые ими местные натяжения изгиба имели минимальное значение.

В табл.I приведены осредненные значения максимально допустимых расстояний между понтонами в зависимости от их грузоподъемности и диаметра трубопровода. Расстояния определены из условия, что местные напряжения не превышают 5% от расчетного сопротивления материала труб, обычно применяемых в практике строительства подводных трубопроводов.

Таблица I

| Диаметр трубопровода, мм | Расстояния между понтонами (м) при различной их грузоподъемности, тс | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | I,5 | 3,0 | 5,0 | I0 | 20 |
| 325 | 8 | - | - | - | - |
| 35I | 9 | - | - | - | - |
| 377 | II | - | - | - | - |
| 426 | I4 | 7 | - | - | - |
| 476 | I8 | 9 | - | - | - |
| 529 | 22 | II | - | - | - |
| 630 | 3I | I6 | I0 | - | - |
| 720 | 50 | 24 | I5 | 7 | - |
| 820 | - | 30 | I8 | 9 | - |
| 920 | - | 40 | 23 | II | - |
| I020 | - | 55 | 35 | I8 | 9 |
| I220 | - | - | 43 | 22 | II |
| I420 | - | - | 64 | 32 | I6 |

При одновременной укладке (по схеме II) нескольких трубопроводов, соединенных между собой поперечными связями, в качестве понтонов могут служить трубопроводы, которые в процессе укладки водой не заполняют. Крепления трубопроводов между собой должны быть рассчитаны на поперечные силы, которые при данной схеме укладки могут достигнуть большой величины.

3.6. Технология погружения плавающего, балластированного трубопровода по схеме III путем залива в него воды заключается в следующем

До спуска плети трубопровода на воду и вывода ее в створ укладки к трубопроводу прикрепляют балластные грузы или его поверхность покрывают утяжеляющим покрытием с таким расчетом, чтобы обеспечить ему минимальную положительную плавучесть.

После установки трубопровода в створ его опускают путем залива воды в трубопровод.

Вариантом технологической схемы III погружения трубопровода может явиться схема с использованием монтажного трубопровода, который помещают внутри укладываемого.

Погружать трубопровод можно путем заполнения водой монтажного трубопровода или межтрубного пространства между укладываемым и монтажным трубопроводом.

3.7. Технология погружения трубопровода, предварительно заполненного водой с прикрепленными понтонами путем открепления понтонов или залива их водой по схеме IV, состоит в следующем:

заполненный воздухом трубопровод оснащают понтонами, последние устанавливают таким образом, чтобы они обеспечивали минимальную расчетную положительную плавучесть конструкции (трубопровод, заполненный водой плюс понтоны);

при помощи насоса трубопровод полностью заливают водой;

путем последовательного открепления понтонов или заполнения их водой погружают трубопровод на дно; схема погружения приведена на рис.4.

3.8. Технологическая схема V погружения балластированного трубопровода с понтонами путем их открепления или залива понтонов водой состоит в следующем:

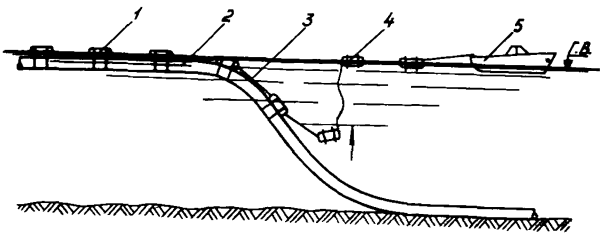


Рис.4. Схема IУ – погружения предварительно заполненного водой трубопровода с прикрепленными понтонами путем открепления понтонов:

I – понтон; 2 – трубопровод, заполненный водой; 3 – трос для соединения понтонов и их отстропки; 4 – отстропленный понтон; 5 – катер

балластированный трубопровод, имеющий отрицательную плавучесть, оснащают разгружающими понтонами, последние устанавливают с таким интервалом, чтобы обеспечить расчетную минимальную положительную плавучесть;

оснащенный понтонами трубопровод выводят в створ укладки и закрепляют оттяжками;

трубопровод укладывают в проектное положение путем открепления понтонов или залива воды в понтоны. Схема погружения аналогична схеме, приведенной на рис.4.

3.9. При погружении трубопровода по схеме УI путем открепления понтонов или заполнения их водой напряжения, возникающие на нижнем участке трубопровода, можно уменьшить, снизив нагрузку путем открепления не всех понтонов, а только некоторых из них. В этом случае можно погружать забалластированный трубопровод путем открепления или залива водой определенного (расчетного) числа понтонов. Схема погружения трубопровода приведена на рис.5.

Технология работ при схеме УI заключается в следующем:

к трубопроводу прикрепляют два вида понтонов, отличающихся только по своему назначению, которые условно можно назвать "разгружающие" и "удерживающие". Назначение разгружающих

понтонов заключается в уменьшении отрицательной плавучести трубопровода до заданной расчетной величины.

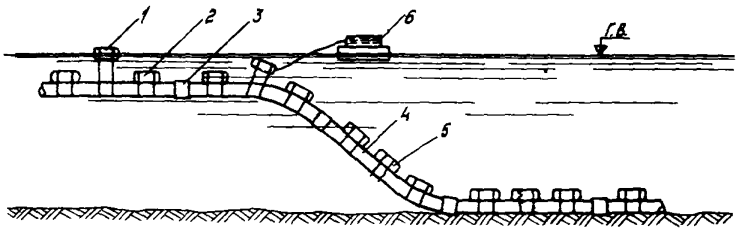


Рис.5. Схема УI - погружение балластированного трубопровода с прикрепленными понтонами путем залива воды в удерживающие понтоны:

I - удерживающие понтоны; 2 - разгружающие понтоны; 3 - балластные грузы; 4 - укладываемый трубопровод; 5- удерживающие понтоны, заполненные водой; 6 - плавучая площадка с насосом для закачки воды

Назначение удерживающих понтонов состоит в том,чтобы придать трубопроводу минимальную расчетную положительную плавучесть перед его погружением.

3.IO. При погружении трубопровода путем залива в него воды напряжения от изгиба могут быть уменьшены, если заполнение трубопровода производить не водой, а ее смесью с материалами, имеющими плотность меньшую, чем плотность воды. В качестве такого "легкого" материала можно применять пенополистирол, емкости с пенополистиролом или пустотелые баллоны (например, понтоны, диаметр которых меньше внутреннего диаметра трубопровода).

Вариантом технологической схемы УП может служить способ заполнения полости трубопровода смесью воды с пенополистиролом, как показано на рис.6. Заполнение полости трубопровода емкостями с пенополистиролом или пустотелыми баллонами может быть выполнено по схемам, приведенным на рис.7 (на рисунках стрелкой показано направление движения воды при заливе трубопровода).

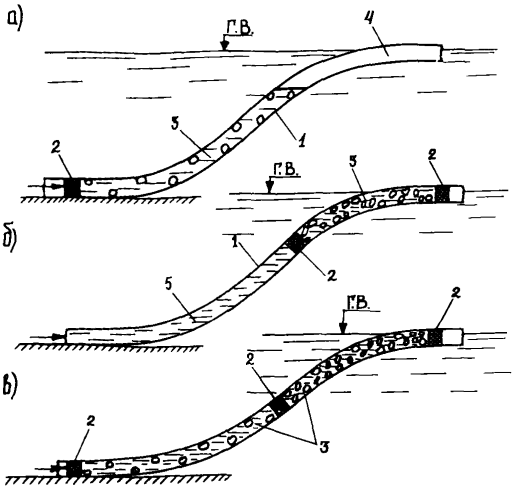


Рис.6. Варианты схемы УП – заполнение трубопровода смесью воды и пенополистирола:

а – заполнение нижнего участка $S$ –образной кривой; б – заполнение верхнего участка $S$ – образной кривой; в–заполнение всего участка трубопровода с $S$ – образным изгибом водой с разной степенью наполнения пенополистиролом; I – погружаемый трубопровод; 2 – разделительный поршень; 3 – участок трубопровода, заполненный смесью воды и пенополистирола; 4 – участок трубопровода, заполненный воздухом; 5 – участок трубопровода, заполненный водой

Количество пенополистирола и понтонов, заполняющих трубопровод, определяют расчетом в зависимости от технических характеристик применяемых материалов и необходимой величины положительной и отрицательной плавучести трубопровода, создаваемых на время погружения (см.ниже п.5.3).

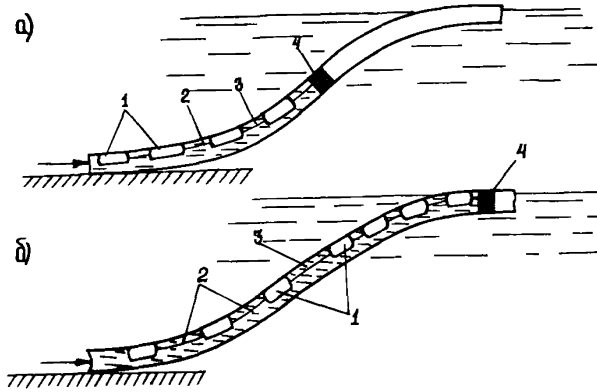


Рис.7. Заполнение трубопровода емкостями с пенополистиролом или пустотельми баллонами:

а – заполнение нижнего участка $S$ -образной кривой водой и емкостями с пенополистиролом или пустотельми баллонами; б–заполнение всего участка $S$ -образной кривой водой и емкостями с пенополистиролом или пустотельми баллонами;

I – емкости с пенополистиролом или понтоны; 2 –трос; 3 – участок трубопровода, заполненный водой; 4 – разделительный поршень

Погружение трубопровода с заполнением его полости водой и материалами, имеющими плотность меньше, чем плотность воды, возможно при изготовлении специального оборудования (например, разделительных поршней) и экспериментальной проверке этого способа укладки.

3.II. Трубопровод при погружении может занимать несколько положений (рис.8), каждому из которых соответствует своя расчетная схема:

консольный изгиб (рис.8,а) возникает в начальной стадии погружения, когда трубопровод опускают с конца, не лежащего на берегу;

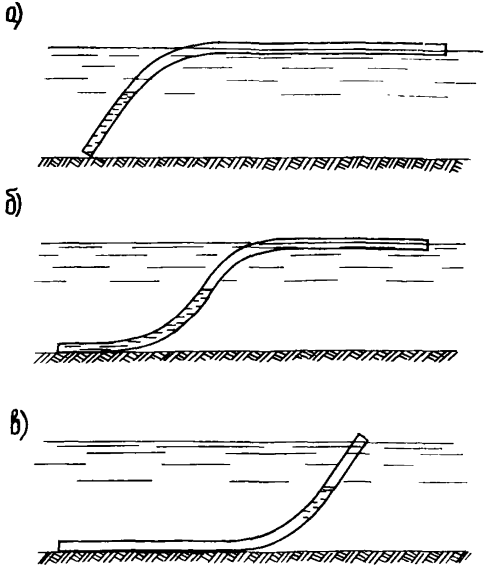


Рис.8. Возможные положения трубопровода при погружении:

а – консольный изгиб; б – $S$ -образный изгиб; в – концевой изгиб

$S$ -образный изгиб (рис.8,б) соответствует положению, при котором часть трубопровода лежит на дне, а часть плавает на поверхности водоема;

концевой изгиб (рис.8,в) возникает в завершающей стадии погружения трубопровода или при подъеме его конца.

3.12. В зависимости от местных условий строительства и конструкции трубопровода то или иное его положение может определять предельную глубину погружения трубопровода.

В процессе погружения трубопроводов могут возникнуть не все три, а один или два расчетных случая (например, если оба конца трубопровода находятся на берегу, то будет наблюдаться только $S$ -образный изгиб, а если на берегу находится только один конец трубопровода и погружение осуществляют со стороны берега, то возникнут схемы $S$ -образного и концевого изгиба).

При разработке проекта производства работ следует определять напряженное состояние трубопровода при всех возможных положениях его при погружении, указанных выше в п.3.II.

Расчеть трубопроводов для каждого положения его при укладке приведены ниже в разделе 5 настоящего Руководства.

## 4. УКЛАДКА ТРУБОПРОВОДОВ С ПРИЛОЖЕНИЕМ РАСТЯГИВАЮЩЕГО УСИЛИЯ

4.I. Приложение растягивающего усилия к трубопроводу в процессе его погружения позволяет значительно увеличить допускаемую глубину укладки трубопровода и расширить область применения способа свободного погружения.

Для труб небольшого диаметра (до 600 мм) растягивающего усилия в пределах до I00 тс достаточно для погружения трубопроводов практически на любые глубины.

С увеличением диаметра трубопровода усилие натяжения, которое необходимо приложить к трубопроводу при погружении на заданную глубину, возрастает. Для труб диаметрами I220, I420 мм это усилие может составить 300 тс и больше. В этом случае натяжение можно применять в сочетании с другими методами уменьшения кривизны трубопровода в процессе погружения, например с уменьшением нагрузок, действующих на трубопровод (закрепление понтонов, заполнение трубопровода "легкими" материалами).

4.2. При укладке подводных трубопроводов способом погружения с натяжением технология производства работ может заключаться в следующем (рис.9).

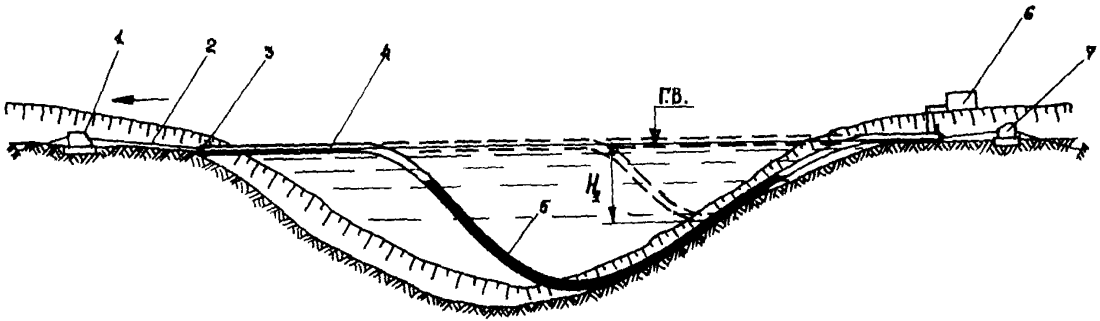


Рис.9. Схема укладки трубопровода способом погружения с приложением растягивающего усилия: 1 – устройство для натяжения трубопровода; 2 – тяговый трос; 3 – патрубок для выпуска воздуха; 4 – участок трубопровода, заполненный воздухом; 5 – участок трубопровода, залитый водой; 6 – насосная установка; 7–анкерная лебедка.

Трубопровод выводят в створ укладки и закрепляют от сноса течением с помощью плавучих опор и оттяжек.

На берегу, противоположном тому, со стороны которого начинают погружение трубопровода, устанавливают тяговое устройство (I) для создания растягивающего усилия.

Путем заполнения трубопровода водой (или другими способами, описанными выше в п.3.I) его погружают без натяжения до тех пор, пока не будет достигнута глубина $H_I$, т.е. максимально допустимая глубина погружения, определяемая расчетом без учета растягивающего усилия (положение, показанное на рис.9, пунктиром).

Дальнейшую укладку осуществляют с приложением продольного усилия, которое передается от тягового устройства к трубопроводу посредством троса (2).

Натяжение трубопровода прекращают, когда глубина по трассе укладки станет опять меньше глубины $H_I$.

Конец погруженного участка трубопровода закрепляют к анкерной лебедке (7), если сил трения между уложенным участком трубопровода и дном водоема недостаточно для предотвращения сдвига трубопровода при его натяжении.

4.3. Необходимую величину растягивающего усилия определяют расчетом в зависимости от диаметра укладываемого трубопровода, действующих нагрузок и глубины погружения (см. ниже раздел 5).

Усилие натяжения трубопровода в процессе укладки необходимо постоянно контролировать с помощью динамометра или другого измерительного прибора.

4.4. Тяговые средства для натяжения трубопровода (лебедки, полиспасты и т.п.) выбирают по максимальной расчетной величине растягивающего усилия.

Изгиб трубопровода в процессе погружения вызовет уменьшение длины проекции трубопровода на горизонтальную ось, что в свою очередь создаст дополнительное натяжение тягового троса. В связи с этим в процессе погружения трубопровода при возрастании тягового усилия сверх расчетного необходимо стравливать тяговой трос натяжного устройства с сохранением в нем заданного усилия натяжения.

4.5. Укладку подводных продуктопроводов, трубопроводов водозаборов и выпусков различного назначения небольшой протяженности с приложением растягивающего усилия можно вести по схеме, приведенной на рис.10.

Трубопровод, необходимой проектной длины, выводят и закрепляют в створе трассы. Погружение начинают со стороны берега, заливая в трубопровод воду или открепляя понтоны.

При глубинах меньше допустимой $H_I$ укладку ведут без приложения растягивающего усилия. С увеличением глубины к правому концу плети прикладывают растягивающее усилие с помощью лебедки, установленной на барже или буксире достаточной мощности.

Для уменьшения расчетного тягового усилия, которое следует приложить к концу плети в завершающей стадии погружения, часть трубопровода можно облегчить навеской понтонов.

4.6. При строительстве подводных трубопроводов большой протяженности на больших глубинах возможна схема укладки, показанная на рис.11. Эта схема подобна, приведенной в разделе 5 Руководства [2],отличие ее состоит в том,что в рассматриваемом нами случае к трубопроводу в процессе укладки и монтажа стыка постоянно прикладывают растягивающее усилие.

После укладки очередной плети (1) ,(см.рис.11) ее конец размещают на судне для стыковки плетей, при этом в трубопроводе поддерживают постоянное заданное натяжение посредством буксира (3).

Поднятый конец трубопровода закрепляют на судне (4) в специальном зажимном устройстве (5), которое позволяет удерживать уложенную плеть в натянутом состоянии. В качестве судна для стыковки может быть использована трубоукладочная баржа, раскрепленная якорями.

Следующую плеть трубопровода (6) выводят в створ трассы и стыкуют на барже с ранее уложенной. После пристыковки к концу плавающей плети (6) прикладывают растягивающее усилие буксиром (3), зажимное устройство освобождают, плети опускают на воду и укладку продолжают.

4.7. В практике строительства подводных трубопроводов может возникнуть необходимость погружения на дно водоема и последующего подъема отдельных длинномерных плетей.

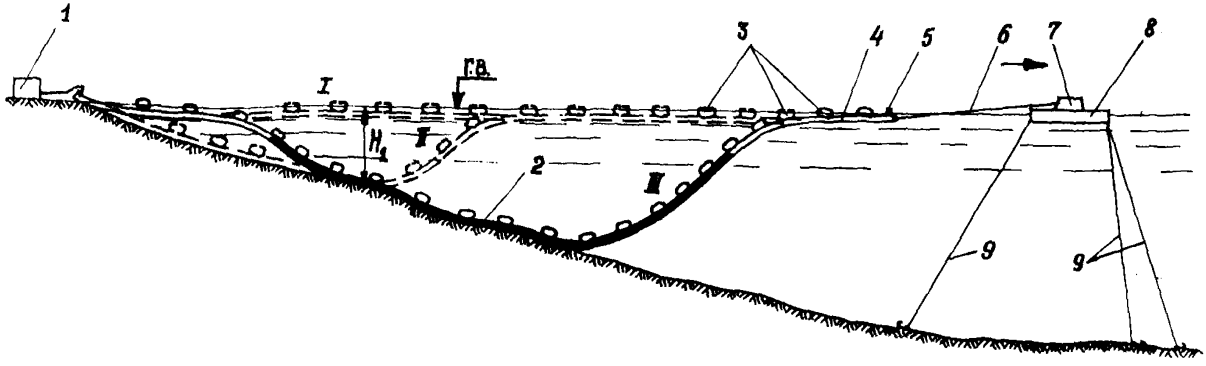


Рис.IO. Схема укладки трубопровода с погружением концевого участка на большие глубины и натяжением трубопровода:

I – насос для закачки воды; 2 – уложенный участок трубопровода; 3 – понтоны; 4 – плавающий участок трубопровода; 5 – патрубок для выпуска воздуха; 6 – тяговый трос; 7 – лебедка; 8 – плавопора для размещения лебедки; 9 – якорные тросы; I–Ш – последовательные положения трубопровода при погружении

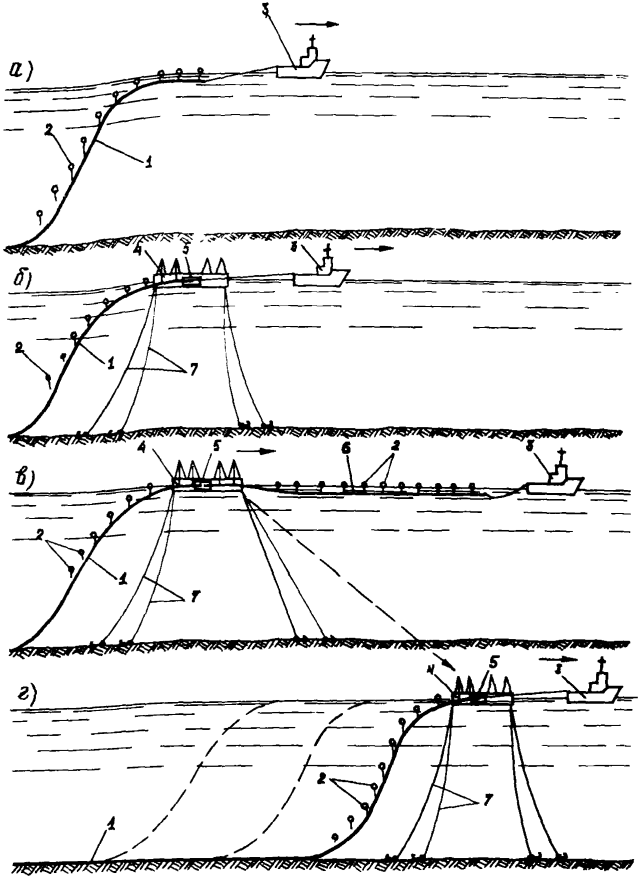


Рис.II. Схема укладки трубопровода с последовательным наращиванием плетей и натяжением (а-г):

I - уложенная плеть трубопровода; 2 - понтоны; 3 - буксир; 4 - судно для стыковки плетей трубопровода; 5 - зажимное устройство; 6 - наращиваемая плеть трубопровода; 7-якорные тросы

Например, при строительстве подводных морских трубопроводов транспортируемую к месту укладки плеть может потребоваться срочно погрузить на дно при неблагоприятных погодных условиях. После окончания шторма плеть трубопровода поднимают на поверхность.

В случае ремонта подводного трубопровода может возникнуть необходимость его подъема с большой глубины на поверхность.

Для уменьшения изгибных напряжений в трубопроводе его погружение и подъем с больших глубин можно выполнять с натяжением, как показано на рис.12. Натяжение плети можно осуществлять буксирами или тяговыми лебедками, установленными на заякоренных плавсредствах.

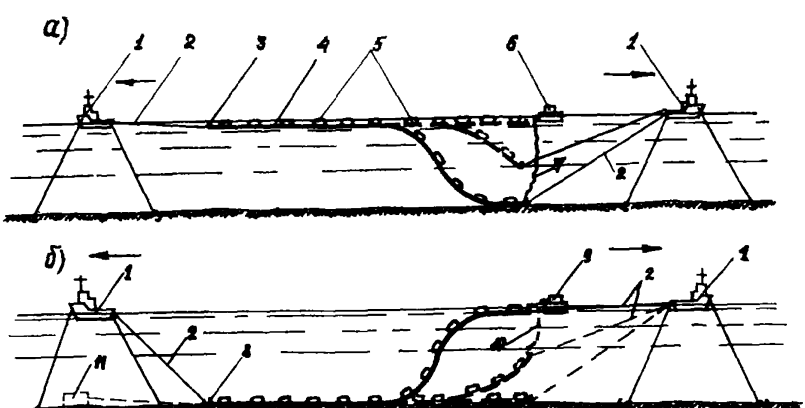


Рис.12. Схема погружения (а) и подъема (б) длинномерной плети трубопровода с натяжением:

1 - буксир; 2 - трос для натяжения; 3 - патрубок для выпуска воздуха; 4 - погружаемая плеть трубопровода; 5 - понтоны; 6 - плавплощадка с водяным насосом; 7 - шланг для закачки воды; 8 - патрубок для выпуска воды; 9 - плавплощадка с компрессором; 10 - шланг для закачки воздуха; 11-анкер

В начальной стадии подъем или погружение плети трубопровода осуществляют без приложения растягивающего усилия. После того, как конец трубопровода достигнет предельной глубины погружения или высоты подъема, работу продолжают с приложением расчетного тягового усилия.

4.8. Приведенные выше схемы укладки и подъема трубопровода с натяжением при наличии соответствующего ледорезного оборудования и достаточной прочности ледяного покрова можно применять для зимних условий строительства.

На рис.13 показаны схемы подъема концевого участка трубопровода с натяжением со льда. Подъем плети осуществляют с помощью грузоподъемных средств, например, лебедок, трубоукладчиков, кранов и т.п. (рис.13,а) или посредством закачки воздуха в трубопровод и вытеснением из него воды (рис.13,б).

В процессе подъема к трубопроводу прикладывают растягивающее усилие. С этой целью могут быть использованы лебедки, тракторы, арттягачи, полиспасты.

Если сила трения на участке соприкосновения трубопровода с дном недостаточно, то для предотвращения сдвига трубопровода при натяжении его левый конец закрепляют к тормозной лебедке или анкерной опоре.

Все технологическое оборудование в этом случае располагают на льду. Для поднимаемого или погружаемого трубопровода, тросов, шлангов и т.п. в ледяном покрове механизированным способом делают майны и прорези необходимых размеров.

4.9. Технические средства, которые могут быть использованы для натяжения трубопровода, и их краткая характеристика приведены в табл.2.

В качестве технических средств для натяжения трубопровода могут быть использованы буксирные суда, некоторые данные по которым приведены в табл.3.

4.10. Все строительно-монтажные работы по подготовке трубопровода к укладке, выводу его в створ трассы и погружению на дно водоема должны быть выполнены в соответствии с правилами техники безопасности, изложенными в "Указаниях по производству работ при сооружении магистральных стальных трубопроводов" [4].

Таблица 2

| Технические средства для натяжения трубопровода | Максимальное тяговое усилие, тс | Диаметр тягового троса, мм | Канатоемкость барабана, м | Мощность, л.с. | Масса, т |
|---|---|---|---|---|---|
| Тяговые лебедки: | | | | | |
| ЛП-I | 50 | 39 | I600 | I00 | 40 |
| ЛП-IА | 72 | 39 | I600 | I08 | 40 |
| ЛП-I5I | I50 | 60,5 | 500 | I08 | 40 |
| ЛП-30I | I50 | 60,5 | I000 | 300+68 | 39,5+36,4 |
| ЛС-30I | 30,5 | 32,5 | 500 | 90 | I2,5 |
| Полиспастное тяговое устройство СУПТР-I треста Союзподводгазстрой | I00 | 35 | Ход подвижного блока полиспаста 50 | 70 | 6 |
| Трубоукладчики: | | | | | |
| Т-I5-30 | I2,5 | - | - | I08 | 24 |
| Т-35-60 | 22,8 | - | - | I80 | 36,4 |
| К-594 | 58 | - | - | 385 | 54,6 |

Таблица 3

| Марка буксира | Тип двигателя | Осадка буксира, м | Мощность, л.с. | Команда, чел. | Тяговое усилие на гаке, тс | Ограничения в плавании |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 202 А | Дизельный | 3,3 | I200 | 27 | I2 | Без ограничения |
| Проект 67 | Дизельный | 2,2 | 600 | 26 | 8 | До 20 миль от порта убежища и 7 баллах ветра |
| Проект 730 | Паровой | 2,9 | 500 | 22 | 5 | Без ограничения |
| - | Дизельный | I,25 | 300 | I3 | 3 | До 20 миль и 6 баллах ветра |
| Проект 733 | Дизельный | 3,5 | 2000 | 32 | 20 | Без ограничения |

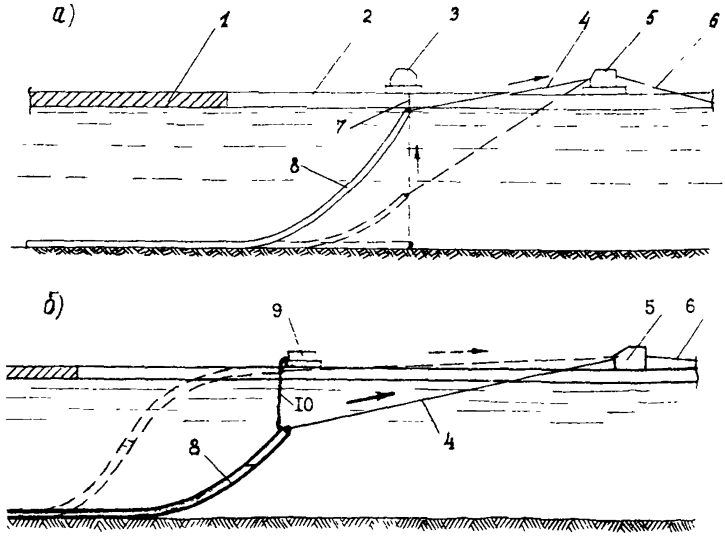


Рис.13. Схема подъема концевого участка трубопровода с натяжением со льда с помощью грузоподъемных средств (а) и закачки воздуха в трубопровод (б):

1 - ледяной покров; 2 - прорезь во льду; 3 - грузоподъемное средство; 4 - тяговый трос; 5 - лебедка для натяжения; 6 - анкерный трос; 7 - трос к грузоподъемному механизму; 8 - поднимаемый участок трубопровода; 9 - компрессор; 10 - шланг для закачки воздуха

## 5 РАСЧЕТЫ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ ИХ УКЛАДКЕ

5.1. Максимальные напряжения, возникающие в трубопроводе в процессе его погружения, определяют в основном возможность укладки трубопровода способом погружения на заданную глубину.

Напряжения в трубопроводе следует определять с учетом следующих факторов:

изгиба трубопровода при его погружении;

гидродинамического воздействия потока воды;

местного изгиба, возникающего при использовании понтонов;

продольного ре ивающего усилия при натяжении трубопровода.

5.2. Для определения напряженно-деформированного состояния стальных трубопроводов, погружаемых на малые глубины (т.е. глубины, равные 25–30 наружным диаметрам трубопровода), можно использовать приближенные методы расчета. В основу этих методов положена упрощенная зависимость изгибающего момента от конфигурации изогнутой оси. Погрешность расчета при таких глубинах для стальных труб, применяемых в настоящее время в практике строительства, не превысит предела, обычно принимаемого в инженерных расчетах.

При укладке трубопроводов на большие глубины (т.е. глубины, превышающие 25–30 наружных диаметров стальной трубы) расчеты следует выполнять по уточненным методикам с использованием численных методов и ЭЦВМ.

## РАСЧЕТЫ ТРУБОПРОВОДОВ, УКЛАДЫВАЕМЫХ НА МАЛЫЕ ГЛУБИНЫ

5.3. Нагрузки, действующие на трубопровод в вертикальной плоскости при его погружении, могут принимать различные значения в зависимости от принятой технологии производства работ. Значения нагрузок для различных схем погружения, приведенных выше в п.3.1, *определяют* в соответствии с табл.4.

В таблице 4 приняты следующие условные обозначения:

$p$ – результирующая нагрузка, действующая на погруженный в воду трубопровод и направленная вниз, кгс/см;

$q$ – результирующая нагрузка, действующая на погруженный в воду трубопровод и направленная вверх, кгс/см;

$g$ – результирующая нагрузка, действующая на трубопровод на суше, кгс/см;

$p_{тр}$ – отрицательная плавучесть, равная весу единицы длины трубопровода, заполненного водой, за вычетом выталкивающей силы воды, кгс/см;

$q_{тр}$ – положительная плавучесть, равная выталкивающей силе воды на единицу длины трубопровода за вычетом веса пустого трубопровода, кгс/см;

$g_{тр}$ – вес единицы длины изолированного и футерованного трубопровода, кгс/см;

$Q$ – грузоподъемность понтона, кгс;

$L$ – расстояние между понтонами, см;

$Б$ – вес балласта за вычетом выталкивающей силы воды на единицу длины трубопровода, кгс/см;

$G$ – вес понтона, кгс/см;

$L_р$ – расстояние между разгружающими понтонами, см;

$L_п$ – расстояние между удерживающими понтонами, см;

$\gamma_б$ – удельный вес балласта, кгс/см$^3$;

$\gamma_о$ – удельный вес воды, кгс/см$^3$;

$\gamma_1$ – удельный вес "легкого" материала;

$V_а, V_в$ – объем "легкого" материала, содержащегося в единице длины участков "а" и "в" трубопровода, на которые соответственно действуют нагрузки $P$ и $q$ см$^3$/см;

$V_{тр}$ – внутренний объем единицы длины трубопровода, см$^3$/см.

5.4. Осадку свободно плавающего трубопровода можно определять с помощью графика, приведенного на рис.I4. На графике показана зависимость:

$$\frac{t_о}{D_н} = f\left(\frac{q}{g}\right) ,$$

где $t_о$ – осадка свободно плавающего трубопровода;

$D_н$ – наружный диаметр трубопровода с учетом изоляции, футеровки, бетонного покрытия и т.п.;

$q$ и $g$ – нагрузки, принимаемые в соответствии с табл.4 в зависимости от принятой схемы погружения.

5.5. В процессе погружения трубопровод может занимать три характерных положения (см.выше п.3.II), каждому из которых соответствует своя расчетная схема.

Усилия в трубопроводе при консольном изгибе (расчетная схема приведена на рис.I5) определяют следующим образом.

Максимальный изгибающий момент в трубопроводе находят по формуле

$$M_0 = \sqrt{6 h E J \omega} \cdot \varphi , \qquad (2)$$

где $M_o$ - максимальный изгибающий момент в трубопроводе от действия вертикальных нагрузок, кгс/см;

$h$ - глубина водоема, см;

$E$ - модуль упругости, кгс/см$^2$;

$J$ - момент инерции трубы, см$^4$;

$\omega$ - весовая нагрузка, $\omega = p + q$, кгс/см;

Таблица 4

| № схемы | Наименование технологической схемы погружения | Нагрузки, действующие на трубопровод при укладке, кгс/см | | |
|---|---|---|---|---|
| | | $p$ | $q$ | $g$ |
| I. | Погружение плавающего, небалластированного трубопровода путем залива в него воды | $P_{тр}$ | $q_{тр}$ | $g_{тр}$ |
| II. | Погружение плавающего, небалластированного трубопровода с прикрепленными к нему понтонами путем залива воды в трубопровод | $P_{тр} - \frac{Q}{L}$ | $q_{тр} + \frac{Q}{L}$ | $g_{тр} + \frac{G}{L}$ |
| III. | Погружение плавающего, балластированного трубопровода путем залива в него воды | $P_{тр} + Б$ | $q_{тр} - Б$ | $g_{тр} + \frac{Б\gamma_б}{\gamma_б - \gamma_в}$ |
| IУ. | Погружение предварительно заполненного водой трубопровода с прикрепленными понтонами путем открепления понтонов | $P_{тр}$ | $\frac{Q}{L} - P_{тр}$ | $g_{тр} + \frac{G}{L}$ |
| У. | Погружение балластированного трубопровода с прикрепленными понтонами путем открепления понтонов | $Б - q_{тр}$ | $q_{тр} - Б + \frac{Q}{L}$ | $g_{тр} + \frac{Б\gamma_б}{\gamma_б - \gamma_в} + \frac{G}{L}$ |
| УI. | Погружение балластированного трубопровода с прикрепленными понтонами путем открепления определенного (расчетного) числа понтонов | $Б - q_{тр} - \frac{Q}{L_p}$ | $q_{тр} + \frac{Q}{L_p} + \frac{Q}{L_п} - Б$ | $g_{тр} + \frac{Б\gamma_б}{\gamma_б - \gamma_в} + \frac{G}{L_п} + \frac{G}{L_p}$ |
| УII. | Погружение плавающего трубопровода с заполнением его смесью воды с "легкими" материалами | $P_{тр} - (\gamma_{см} - \gamma_в)V_п$ | $q_{тр} - \gamma_в V_{тр} + \gamma_в V_в - \gamma_{см} V_в$ | $g_{тр} + \gamma_{см}(V_в + V_в) - \gamma_в (V_в - V_{тр})$ |

$\varphi$ - функция, вычисляемая по формуле

$$\varphi = \sqrt{\frac{\left(\frac{p}{q}\right)^2}{2n^3 - 3n^2 + 1}}, \qquad (3)$$

или $\varphi$ находят по графику, приведенному на рис.I6 в зависимости от отношения $\frac{p}{q}$.

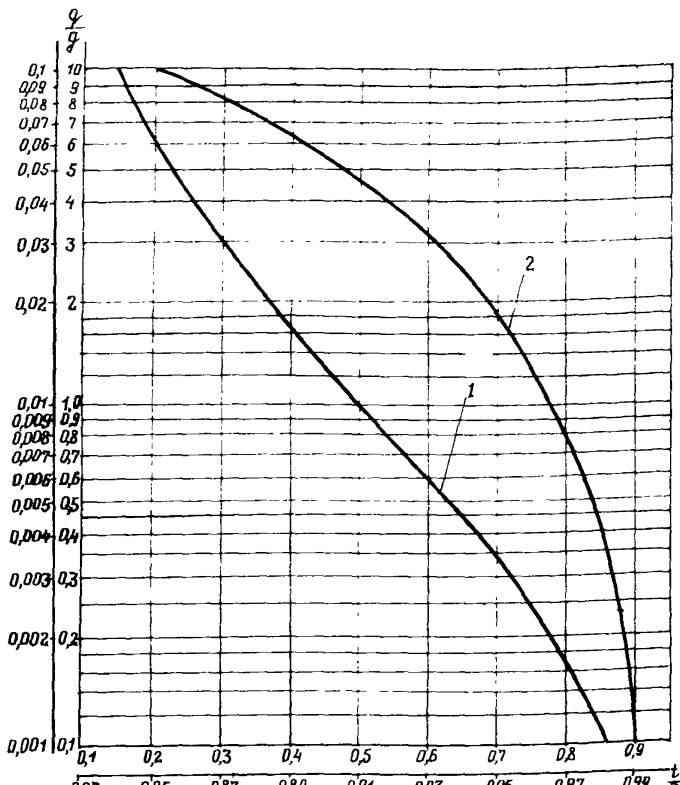


Рис.I4. График зависимости $\frac{t_o}{D_н} = f\left(\frac{q}{q}\right)$ для определения осадки плавающего трубопровода:
I - для значения $q/q$ от 0,I до I0,0 и $t_o/D_н$ от 0,I45 до 0,855; 2 - для значения $q/q$ от 0,00I до 0,I и $t_o/D_н$ от 0,855 до 0,99

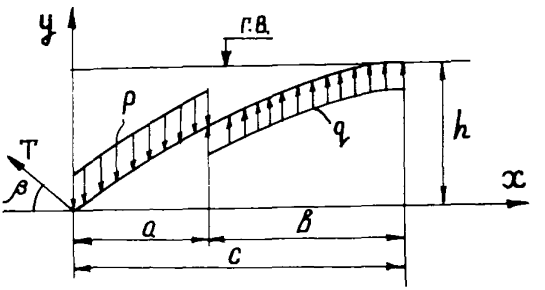


Рис.I5. Расчетная схема трубопровода при консольном изгибе

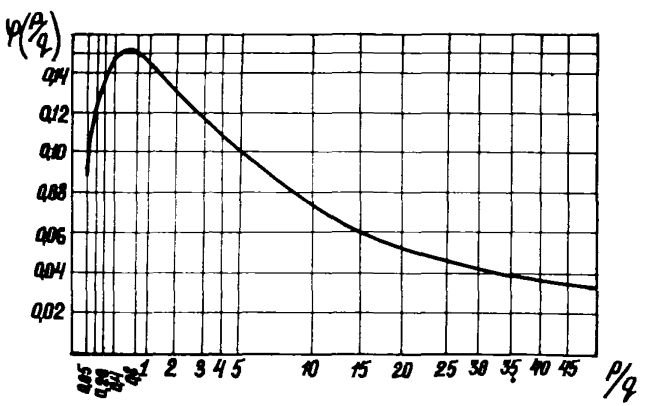


Рис.I6. График зависимости функции $\varphi$ от отношения $\frac{p}{q}$

Значения $n$ определяют по формуле:

$$n = \left(\frac{p}{q} + 1\right) + \sqrt{\left(\frac{p}{q} + 1\right)^2 - \left(\frac{p}{q} + 1\right)}, \qquad (4)$$

где $p$ и $q$ – нагрузки, принимаемые по табл.4 в зависимости от выбранной схемы погружения.

Длины участков изогнутой оси трубопровода определяют по формулам:

$$a = \sqrt[4]{\frac{6hEJ}{\omega}} \cdot \sqrt[4]{\frac{4}{2n^3 - 3n^2 + 1}}; \qquad (5)$$

$$c = n \cdot a ; \qquad (6)$$

$$b = c - a , \qquad (7)$$

где $c$ – полная длина изогнутого участка трубопровода, см;

$a$ – длина изогнутого участка трубопровода, на котором действует нагрузка $p$, см;

$b$ – длина изогнутого участка трубопровода, на котором действует нагрузка $q$, см.

При погружении трубопровода с приложением растягивающего усилия, действующего под углом $\beta$ к горизонту (см. рис.15), максимальный изгибающий момент $M_0$ уменьшается на величину:

$$M_T = T\left(h \cos\beta + 0{,}65\, c \cdot \sin\beta\right), \qquad (8)$$

где $M_T$ – изгибающий момент в трубопроводе от действия растягивающего усилия, кгс/см;

$h$ – глубина водоема, см;

$\beta$ – угол между направлением растягивающего усилия и горизонтом;

$T$ – растягивающее усилие, прикладываемое к трубопроводу, кгс;

Максимальные напряжения, возникающие в трубопроводе, определяют по формуле

$$\sigma = \frac{M_0 - M_T}{W} + \frac{T}{F} , \qquad (9)$$

где $\sigma$ – максимальные напряжения, возникающие в трубопроводе от действия вертикальных нагрузок и продольных усилий, кгс/см$^2$;

$M_0$ – максимальный изгибающий момент в трубопроводе от действия вертикальных нагрузок, кгс/см;

$M_т$ – изгибающий момент в трубопроводе от действия растягивающего усилия, кгс/см;

$W$ – момент сопротивления сечения трубы, см$^3$;

$F$ – площадь сечения трубы, см$^2$.

5.6. Расчет напряженного состояния трубопровода, погружаемого с $S$ – образным изгибом без приложения растягивающего усилия (см.рис.3), выполняют в соответствии с методикой, приведенной в Рекомендациях [I] и в работе [5].

Максимальный изгибающий момент в трубопроводе на нижнем и верхнем участке изгиба в этом случае определяют по формуле:

$$M_0 = \frac{1}{2}\sqrt{6hEJw} \cdot \psi, \qquad (10)$$

где $\psi$ – функция, определяемая для расчета максимального изгибающего момента на нижнем участке изгиба $a$ по формуле

$$\psi_a = \frac{2(n-1)}{n(n+2)}; \qquad (11)$$

на верхнем участке изгиба $в$ – по формуле

$$\psi_в = \frac{2(n-1)}{n(3n-2)}. \qquad (12)$$

Значение $n$ определяют, решая уравнение.

$$n^3 - 3\left(1 + \frac{P}{q}\right)n + 2\left(1 + \frac{P}{q}\right) = 0. \qquad (13)$$

Значения функций $\psi_a$ и $\psi_в$ в зависимости от отношения $\frac{P}{q}$ можно найти по графикам, приведенным в [I] и [5].

При расчете трубопровода, укладываемого с $S$ – образным изгибом и приложением растягивающего усилия в соот-

ветствии со схемой, приведенной на рис.9, максимальный изгибающий момент в трубопроводе ( $M_0$ ) должен быть уменьшен на величину:

$$M_т = 0{,}2T\cdot\sqrt{\frac{h}{EJ\omega}}\cdot\left(1-\frac{Th^2}{7{,}5EJ}\right)M_0', \qquad (14)$$

где $M_0'$ – наибольший из максимальных изгибающих моментов, действующих на участках а и в, определенный по формуле (10).

Максимальные напряжения, возникающие в трубопроводе, определяют по формуле (9).

Растягивающее усилие, которое необходимо приложить к трубопроводу ( $T$ ) при укладке на заданную глубину $h$ с заданным уровнем изгибных напряжений, можно определить по приближенной формуле

$$T=\frac{EJ}{h^2}\left(3{,}73-\sqrt{13{,}9-37{,}1\sqrt{\frac{\omega h^3}{EJ}}+30{,}4\,\frac{\sigma\omega h}{EJ\psi}}\right), \qquad (15)$$

где $\sigma$ – максимальные допускаемые изгибные напряжения в трубопроводе, кгс/см$^2$;

$\psi$ – функция, определяемая по формулам (11), (12), (13).

Для облегчения расчетов по формуле (15) на рис.17 приведены графики безразмерных параметров $\frac{\omega h^3}{EJ}$, $\frac{Th^2}{EJ}$, $\frac{\sigma Wh}{EJ\psi}$, с помощью которых легко определить величину растягивающего усилия или изгибного напряжения в трубопроводе.

5.7. Положению концевого изгиба трубопровода при его погружении или подъеме соответствует расчетная схема, приведенная на рис.18. Эта схема соответствует технологической схеме, показанной на рис.12 б.

Полную длину изгиба трубопровода $c$, а также длины участков $a$ и $b$ определяют по формулам:

$$c=\sqrt[4]{\frac{24EJh}{\omega}\cdot\frac{1}{\alpha^2(1-\alpha)(3-\alpha)}}; \qquad (16)$$

$$a=\alpha\cdot c; \qquad (17)$$

$$b=c-a, \qquad (18)$$

где

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{1+\frac{p}{q}}} \quad . \qquad (19)$$

Реакцию грунта в месте касания трубопровода с дно водоема $R$ вычисляют по формуле

$$R = C\omega\alpha(1-\alpha). \qquad (20)$$

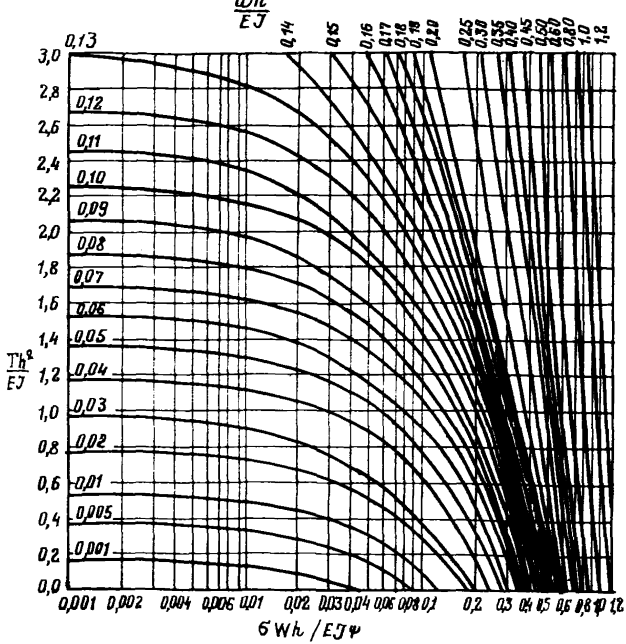


Рис.17. Зависимость растягивающего усилия от параметров трубопровода при укладке с $S$ -образным изгибом

Максимальный изгибающий момент, возникающий в трубопроводе $M_o$, равен

$$M_o = \frac{R^2}{2\rho} . \qquad (21)$$

При наличии растягивающей силы значение максимального изгибающего момента должно быть уменьшено на величину $M_T$ :

$$M_T = 0{,}9Th , \qquad (22)$$

где $T$ – растягивающее усилие, кгс;

$h$ – глубина водоема, см.

Напряжения, возникающие в трубопроводе при погружении или подъеме концевого участка, определяют по формуле (9).

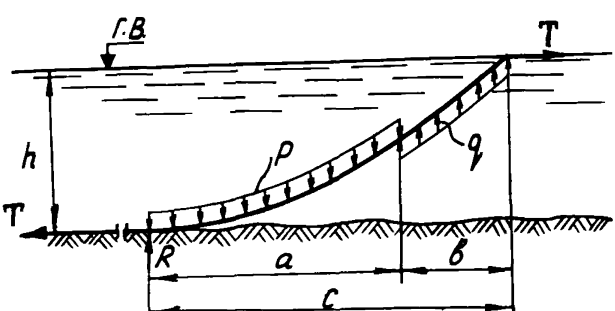


Рис.18. Расчетная схема трубопровода при концевом изгибе

5.8. Расчетная схема трубопровода, поднимаемого или погружаемого с помощью грузоподъемных средств с приложением растягивающего усилия, показана на рис.19. Эта схема соответствует технологической схеме, приведенной на рис.13,а.

Расчет напряженного состояния трубопровода выполняют следующим образом: зная высоту подъема $h$ и величину отрица-

тельной планучести трубопровода для некоторого выбранного значения растягивающего усилия $N$, определяют безразмерный параметр $h_1 = \frac{hN^2}{pEJ}$.

С помощью графиков (рис.20) определяют безразмерные параметры $\varphi$ и $M_1$; вычисляют длину поднимаемого участка трубопровода $C$ и максимальный изгибающий момент в пролете $M$ по формулам:

$$C = \varphi\sqrt{\frac{EJ}{N}}; \qquad (23)$$

$$M = \frac{M_1 PEJ}{N}. \qquad (24)$$

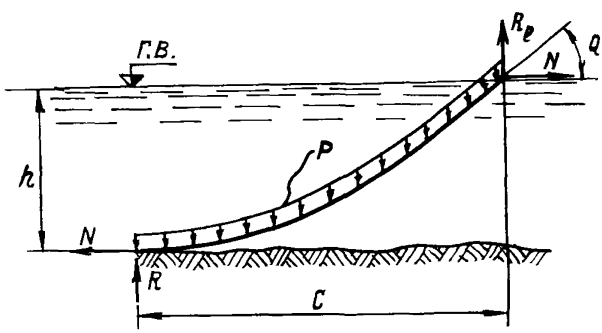


Рис.19. Расчетная схема подъема трубопровода краном с приложением растягивающего усилия

Графики на рис.20 построены на основании следующих соотношений:

$$M_1 = 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{ch\varphi - 1}{Sh\varphi}\right)^2}; \qquad (25)$$

$$h_1 = \frac{\varphi^2}{2} - \left(\frac{ch\varphi - 1}{Sh\varphi}\right)\varphi. \qquad (26)$$

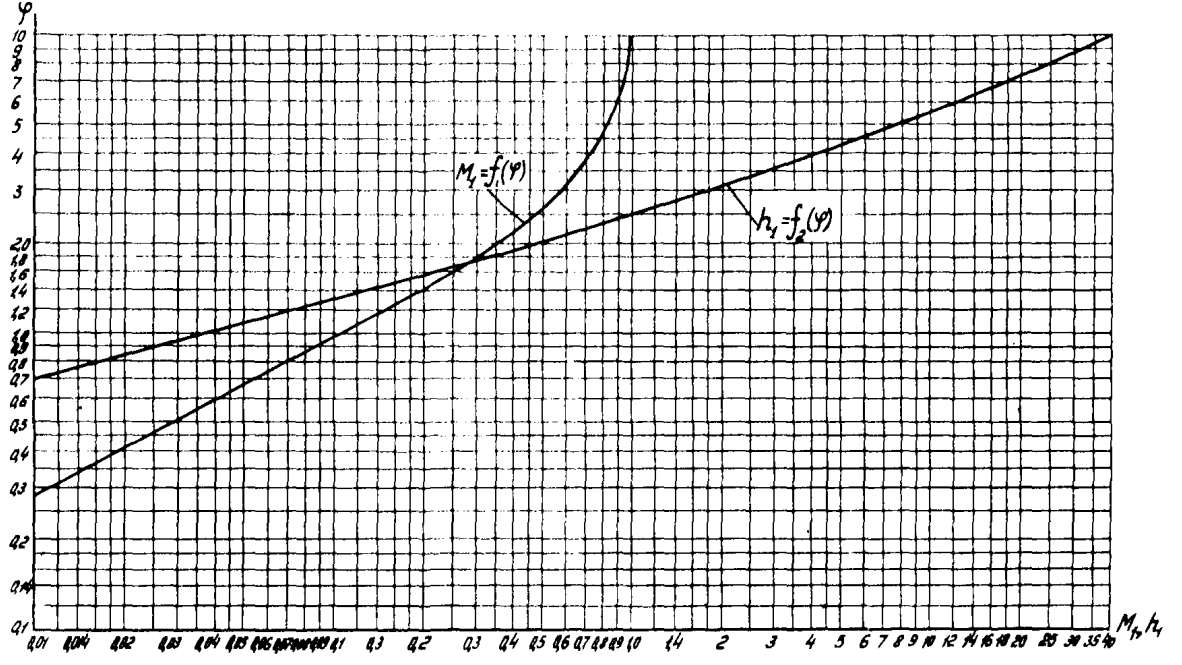


Рис.20. График зависимости безразмерных параметров $M_1$ и $h_1$ от параметра $\varphi$

Зная максимальный изгибающий момент и растягивающее усилие, определяют продольные напряжения в трубопроводе. Если вычисленные напряжения велики, то увеличивают значение растягивающего усилия или уменьшают нагрузку $p$ и расчет повторяют.

Усилие на крюке грузоподъемного механизма $R_e$ определяют по формуле

$$R_e = p\frac{C}{2} + \frac{Nh}{C}. \qquad (27)$$

Угол наклона трубопровода к горизонту $\theta$ у поверхности воды (см.рис.I9) можно определить из выражения

$$tg\,\theta = \left[\frac{2(1-ch\varphi)}{sh\varphi} + \varphi\right]p\sqrt{\frac{EJ}{N^3}}. \qquad (28)$$

При подъеме или погружении трубопровода без приложения растягивающего усилия для схемы (см.рис.I9) справедливы соотношения:

$$h = \frac{pC^4}{24EJ}; \qquad (29)$$

$$M = 0{,}613\sqrt{EJph}; \qquad (30)$$

$$tg\,\theta = \frac{pC^3}{12EJ}. \qquad (31)$$

В прил.I приведены примеры расчета трубопровода, погружаемого на малые глубины по различным технологическим схемам.

## РАСЧЕТЫ ТРУБОПРОВОДОВ, УКЛАДЫВАЕМЫХ НА БОЛЬШИЕ ГЛУБИНЫ

5.9. Методы расчета напряженно-деформированного состояния трубопроводов, погружаемых на небольшие глубины,

основаны на целом ряде допущений, которые становятся неприемлемыми при укладке на глубины, превышающие 20–30 наружных диаметров трубопроводов. В связи с этим при погружении трубопроводов на большие глубины следует пользоваться уточненными методами расчета.

Для определения напряженно-деформированного состояния трубопровода, укладываемого способом свободного погружения, можно пользоваться методикой, изложенной в "Руководстве по методам расчета подводных трубопроводов при погружении на большие глубины" [6].

В основу этой методики положен численный метод решения с использованием неявной конечно-разностной схемы. Решение задачи – определение напряжений и перемещений в погружаемом трубопроводе, выполняется на ЭВМ БЭСМ-6 по программе, составленной на алгоритмическом языке Фортран.

5.10. Программа ГЭК-I, приведенная в Руководстве [6], позволяет рассчитать напряжения и конфигурацию трубопровода при погружении с заливом без приложения растягивающих усилий (согласно схеме, приведенной на рис.3); программа ГЭК-2 – напряжения и конфигурацию при погружении заливом с приложением продольных растягивающих усилий (по схеме, указанной на рис.9). По программе ГЭК выполняют вычисления напряжений и перемещений трубопровода в процессе погружения конца плавающей плети (см.рис.8,а).

5.11. Для вычисления по указанным программам вводят исходные данные, которые записывают в виде безразмерных параметров в соответствии с рекомендациями, приведенными в Руководстве [6].

В результате счета программы выдают на печать значения следующих безразмерных параметров:

длины участка трубопровода, заполненного водой;

уровня воды, залитой в трубопровод;

прикладываемого растягивающего усилия;

таблицу значений декартовых координат оси трубопровода $x_i$, $w_i$, углов наклона участков трубопровода $\alpha_i$, кривизны $\frac{\partial \alpha}{\partial s}$, а следовательно, изгибных напряжений на каждом участке и продольных усилий $T_i$ по длине плети.

5.I2. Изложенные в Руководстве [6] методы расчета можно также применять при укладке трубопроводов на малые глубины.

Программы ГЕК-I, ГЕК-2 и ГЕМ позволяют рассчитывать трубопровод, погружаемый на дно акватории, не только заполнением его водой, но и по любой схеме, указанной выше в п.3.I.

Относительную величину дополнительной пригрузки $\beta$, которая является необходимым исходным параметром для расчета по программам (см.табл.5 приложения П), можно определить по формуле

$$\beta = \frac{P + Q}{g}, \qquad (32)$$

где $P, g, Q$ – вертикальные нагрузки, действующие на трубопровод в процессе погружения, значения которых находят по табл.4 в зависимости от способа погружения трубопровода.

Если при погружении подводного трубопровода используют понтоны различного назначения, то в подпрограмму – функцию определения выталкивающей силы вносят соответствующие дополнения.

В прил.2 приведены примеры расчета по указанным программам.

## СУММАРНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ТРУБОПРОВОДЕ И ПРОВЕРКА ПРОЧНОСТИ

5.I3. При выводе трубопровода в створ подводного перехода, его закреплении с помощью оттяжек и погружении необходимо учитывать гидродинамическое воздействие потока воды на трубопровод.

Силу лобового сопротивления на единицу длины трубопровода, обусловленную действием течения, определяют по формуле

$$P_x = \frac{1}{2} C_x \cdot \gamma_в \cdot v_т^2 D, \qquad (33)$$

где $P_x$ – сила лобового сопротивления на I см трубопровода, кгс/см;

$C_x$ – коэффициент лобового сопротивления;

$\gamma_в$ – плотность воды, кг/см$^3$;

$V_т$ – скорость набегающего потока, см/сек;

$D$ – наружный диаметр трубопровода с изоляцией, футеровкой, слоем бетона и т.д., см.

Коэффициент лобового сопротивления $C_x$ зависит от скорости потока, формы обтекаемого тела, состояния его поверхности и может изменяться в диапазоне от 1,2 до 0,4.

Напряжения в трубопроводе от действия гидродинамического давления под действием течения определяют по формуле

$$\sigma_г = \frac{K_0 p_x \ell_р^2}{W}, \qquad (34)$$

где $\sigma_г$ – изгибные напряжения в трубопроводе от гидродинамического давления, кгс/см$^2$;

$K_0$ – коэффициент опорного момента многопролетной неразрезной балки, определяемый в зависимости от количества оттяжек, удерживающих трубопровод;

$\ell_р$ – расстояние между тросовыми оттяжками, см;

$W$ – момент сопротивления трубы, см$^3$.

5.14. При использовании понтонов возникают дополнительные местные напряжения изгиба, которые при совпадении знака следует суммировать с продольными напряжениями, возникающими при погружении. Эти напряжения определяют расчетом трубопровода, как многопролетной балки с опорами в местах закрепления понтонов, по формуле

$$\sigma_п = 0{,}078 \frac{Q L_п}{W}, \qquad (35)$$

где $\sigma_п$ – местные напряжения в трубопроводе в местах закрепления понтонов, кгс/см$^2$;

$Q$ – грузоподъемность понтонов, кгс;

$L_п$ – расстояние между понтонами, см.

5.15. Максимальные продольные напряжения в трубопроводе определяют по формуле

$$\sigma_{пр} = \sqrt{(\sigma + \sigma_п)^2 + \sigma_г^2} + \sigma_N, \qquad (36)$$

где $\sigma_{пр}$ – максимальные продольные напряжения в трубопроводе, кгс/см²;

$\sigma$ – максимальные изгибные напряжения в трубопроводе, определяемые расчетом в зависимости от принятой технологической схемы погружения, кгс/см²;

$\sigma_{п}$ – местные напряжения при закреплении понтонов, кгс/см²;

$\sigma_{г}$ – напряжения от гидродинамического воздействия потока, кгс/см²;

$\sigma_{N}$ – напряжения от продольного растягивающего усилия, кгс/см².

$\sigma_{N}$ определяют для такого сечения трубопровода, в котором найден максимальный изгибающий момент.

Проверку прочности стенок подводного трубопровода проводят согласно СНиП по проектированию магистральных трубопроводов из условия

$$\sigma_{пр} \leq \frac{C}{K_н} R_2^н , \qquad (37)$$

где $R_2^н$ – нормативное сопротивление растяжению-сжатию металла труб, равное пределу текучести, кгс/см²;

$C$ – коэффициент, принимаемый равным I для трубопроводов III и IУ категорий, 0,85 для I и II категорий и 0,65 для категории В;

$K_н$ – коэффициент надежности, принимаемый по табл.I0 СНиП равным I для трубопроводов диаметром меньше I200 мм, I,05 при диаметре I200 мм и I,I при диаметре I400 мм.

Если условие (37) не выполняется, то можно провести мероприятия, рекомендованные выше в п.I.7.

5.I6. При погружении подводных трубопроводов на большие глубины без залива их водой следует выполнять проверку устойчивости стенок трубопровода при совместном действии сжимающих напряжений от изгиба и внешнего гидростатического давления. Проверку выполняют по формуле (26), приведенной в Руководстве [6].

Понтоны, которые применяют для погружения трубопровода на большие глубины, следует проверять на гидростатическое давление. При необходимости они могут быть заполнены газом под расчетным давлением.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение I

## ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ТРУБОПРОВОДА, ПОГРУЖАЕМОГО НА МАЛЫЕ ГЛУБИНЫ ПО РАЗЛИЧНЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ СХЕМАМ

Определить максимальные напряжения в трубопроводе диаметром I220 мм с толщиной стенки I6,8 мм укладываемого на глубину I2 м при различных схемах погружения. Трубопровод покрыт полимерной изоляцией и сплошной футеровкой. Общими данными для всех схем погружения являются:

| | | | |
|---|---|---|---|
| $h$ | = I220 см; | $q_{тр}$ | = 6,0 кгс/см; |
| $D$ | = I22 см; | $W$ | = I8833 $см^3$; |
| $\delta$ | = I,68 см; | $J$ | = II48807 $см^4$; |
| $P_{тр}$ | = 4,I кгс/см; | $F$ | = 635 $см^2$; |
| $q_{тр}$ | = 6,95 кгс/см; | $\sigma_т$ | = 4200 кгс/$см^2$; |
| $\omega$ | = II,05 кгс/см; | $E$ | =2,I·I0$^6$ кгс/$см^2$. |

Максимальные продольные напряжения в трубопроводе не должны превышать напряжений, определяемых по формуле (37):

$$\sigma_{пр} \leq \frac{c}{k_н} R_2^н = \frac{0,65}{I,05} \; 4200 = 2600 \text{ кгс/см}^2.$$

Пример I. Трубопровод погружают на дно водоема с заполнением его водой по схеме I без приложения растягивающего усилия.

Консольный изгиб

Определив отношение $\frac{P}{q} = \frac{4,I}{6,95} = 0,59$, по формулам (4) и (3) или графику (см.рис.I6), находим функцию $\varphi$.

$$n = \left(\frac{P}{q}+1\right) + \sqrt{\left(\frac{P}{q}+1\right)^2 - \left(\frac{P}{q}+1\right)} = (0,59+1) + \sqrt{(0,59+1)^2-(0,59+1)} = 2,56;$$

$$\varphi = \sqrt{\frac{(P/q)^2}{2n^3-3n^2+1}} = \sqrt{\frac{0,59^2}{2\times 2,56^3 - 3\times 2,56^2+1}} = 0,153.$$

Максимальный изгибающий момент в трубопроводе определяем по формуле (2):

$$M_0 = \sqrt{6hEJ\omega}\cdot\varphi = \sqrt{6\times1200\times2{,}1\times10^6\times114880{,}7\times11{,}05}\times0{,}153 = 0{,}66\times10^8\ кгс\cdot см.$$

Максимальные изгибные напряжения в соответствии с формулой (9) при отсутствии растягивающего усилия T равны:

$$\sigma = \frac{M_0}{W} = \frac{0{,}66\times10^8}{18833} = 3500\ кгс/см^2.$$

S-образный изгиб

Максимальный изгибающий момент в трубопроводе без учета продольных усилий определяют по формуле (10):

$$M_0 = \frac{1}{2}\sqrt{6hEJ\omega}\cdot\psi,$$

где функцию $\psi$ находят по формулам (12) и (13).

При $\frac{P}{q} = 0{,}59$, $\psi_в = 0{,}26$.

По формуле (10)

$$M_0 = \frac{1}{2}\sqrt{6\times1200\times2{,}1\times10^6\times114880{,}7\times11{,}05}\times0{,}26 = 0{,}565\times10^8\ кгс\cdot см.$$

Максимальные изгибные напряжения на участке $B$ по формуле (9) составят:

$$\sigma = \frac{M_0}{W} = \frac{0{,}565\times10^8}{18833} = 3010\ кгс/см^2.$$

Концевой изгиб

По формуле (19) определяем $\alpha$:

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{1+\frac{P}{q}}} = \sqrt{\frac{1}{1+0{,}59}} = 0{,}793.$$

Длину упругой линии $C$ находим по формуле (16):

$$C = \sqrt[4]{\frac{24EJk}{\omega}} \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{\alpha^2(1-\alpha)(3-\alpha)}} =$$

$$= \sqrt[4]{\frac{24 \times 2{,}1 \times 10^6 \times 1148807 \times 1200}{11{,}05}} \sqrt[4]{\frac{1}{0{,}793^2(1-0{,}793)(3-0{,}793)}} =$$

$$= 12360 \text{ см}.$$

Реакцию грунта $R$ определяем по формуле (20):

$$R = \alpha C \omega (1-\alpha) = 0{,}793 \times 12360 \times 11{,}05 (1-0{,}793) = 22420 \text{ кгс}.$$

Максимальный изгибающий момент по формуле (21) равен:

$$M_0 = \frac{R^2}{2 \cdot p} = \frac{22420^2}{2 \times 4{,}1} = 6{,}13 \times 10^7 \text{ кгс} \cdot \text{см}.$$

Изгибные напряжения по формуле (9) составили:

$$\sigma = \frac{M_0}{W} = \frac{6{,}13}{18833} = 3255 \text{ кгс/см}^2.$$

Во всех трех положениях, возможных при укладке трубопровода, максимальные изгибные напряжения, возникающие в нем, превышают расчетные. Таким образом, погружать трубопровод по схеме I заливом его водой без дополнительных мероприятий, упомянутых выше в п.I.7, не представляется возможным.

Пример 2. Трубопровод погружают на дно водоема по схеме II с применением понтонов.

К трубопроводу прикрепляют понтоны грузоподъемностью 10 тс, устанавливаемые через 27 м, вес понтона 1900 кгс.

Согласно табл.4:

$$p = p_{тр} - \frac{Q}{L} = 4{,}1 - \frac{10000}{27} = 0{,}4 \text{ кгс/см};$$

$$q = q_{тр} + \frac{Q}{L} = 6{,}95 + \frac{10000}{27} = 10{,}65 \text{ кгс/см};$$

$$q = q_{тр} + \frac{G}{L} = 6{,}0 + \frac{1900}{27} = 6{,}7 \text{ кгс/см}.$$

Консольный изгиб

Новое отношение $\frac{\rho}{q}$ составит $\frac{0,4}{10,65} = 0,0376$.

По формулам (3), (4) вычисляем функцию $\varphi = 0,101$.

Максимальный изгибающий момент в трубопроводе по формуле (2) равен:

$$M_0 = \sqrt{6 h E J \omega}\ \varphi = \sqrt{6 \times 1200 \times 2,1 \times 10^6 \times 1148807 \times 11,05 \times 0,101} = 0,44 \times 10^8 \text{ кгс/см}.$$

Максимальные напряжения по формуле (9) составят:

$$\sigma = \frac{M_0}{W} = \frac{0,44 \times 10^8}{18833} = 2349 \text{ кгс/см}^2.$$

При закреплении понтонов местные напряжения в трубопроводе определяем по формуле (35):

$$\sigma_п = 0,078 \frac{qL}{W} = 0,078 \frac{10000 \times 2700}{18833} = 112 \text{ кгс/см}^2.$$

При отсутствии течения и продольного растягивающего усилия суммарные продольные напряжения в трубопроводе по формуле (36) равны:

$$\sigma_{пр} = \sigma + \sigma_п = 2349 + 112 = 2461 \text{кгс/см}^2.$$

Проверку для $S$ -образного и концевого изгиба можно не производить, так как напряжения в трубопроводе при консольном изгибе будут наибольшими при отношении $\frac{\rho}{q} \leq 1$.

Таким образом, для погружения I км трубопровода по схеме П потребуется 37 понтонов грузоподъемностью по 10 тс.

Пример 3. Погружение трубопровода по схеме Ь с предварительной его балластировкой

Для придания трубопроводу минимальной расчетной положительной плавучести его перед укладкой балластируют отдельными грузами или сплошным утяжеляющим покрытием.

Определим вес бетонного балласта $Б_в$ с $\gamma_б$ =2300кгс/м$^3$ на I см трубопровода при заданной положительной плавучести $q$ = 0,6 кгс/см.

Согласно табл.4:

$$Б = q_{тр} - q = 6,95 - 0,6 = 6,35 \text{ кгс/см};$$

$$p = p_{тр} + Б = 4,1 + 6,35 = 10,45 \text{ кгс/см};$$

$$q = q_{тр} - Б = 6,95 - 6,35 = 0,6 \text{ кгс/см}.$$

Вес бетонного балласта $Б_в$ на воздухе определим по формуле

$$Б_в = \frac{Б\gamma_б}{\gamma_б - \gamma_0} = \frac{6,35 \times 2300}{2300 - 1000} = 11,2 \text{ кгс/см}.$$

Консольный изгиб

Определив отношение $\frac{p}{q} = \frac{10,45}{0,6} = 17,4$, аналогично предыдущим расчетам находим

$\varphi$ = 0,057;

по формуле (2)

$$M_0 = \sqrt{6hEJ\omega}\ \varphi = \sqrt{6 \times 1200 \times 2,1 \times 10^6 \times 1148807 \times 11,05} \times 0,057 = 0,248 \times 10^8 \text{ кгс.см};$$

по формуле (9)

$$\sigma = \frac{M_0}{W} = \frac{0,248 \times 10^8}{18833} = 1320 \text{ кгс/см}^2.$$

S -образный изгиб

Максимальный изгибающий момент возникает на нижнем участке изгиба, его определяют в соответствии с п.5.6 по формуле (10):

$$M_0 = \frac{1}{2}\sqrt{6hEJ\omega} \cdot \psi,$$

где $\Psi = 0,19$ при $\frac{p}{q} = 17,4$;

$$M_0 = \frac{1}{2}\sqrt{6 \times 1200 \times 2,1 \times 10^6 \times 1148807 \times 11,05} \cdot 0,19 = 0,413 \times 10^8 \text{ кгс.см.}$$

по формуле (9)

$$\sigma = \frac{0,413 \times 10^8}{18833} = 2200 \text{ кгс/см}^2.$$

Концевой изгиб

По формуле (19) определяем $\alpha$:

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{1+\frac{p}{q}}} = \frac{1}{1+17,4} = 0,234.$$

Длину упругой линии $C$ находим по формуле (16):

$$C = \sqrt[4]{\frac{24 \times 2,1 \times 10^6 \times 1148807 \times 1200}{11,05} \cdot \frac{1}{0,234^2 \times (1-0,234)(3-0,234)}} = 15258 \text{ см.}$$

Реакцию грунта $R$ определяем по формуле (20):

$$R = \alpha C \omega (1-\alpha) = 0,234 \times 15258 \times 11,05 (1-0,234) = 30220 \text{ кгс.}$$

Максимальный изгибающий момент по формуле (21) равен:

$$M_0 = \frac{R^2}{2p} = \frac{30220^2}{2 \times 10,45} = 4,37 \times 10^7 \text{ кгс.см.}$$

Максимальные изгибные напряжения по формуле (9) составят:

$$\sigma = \frac{M_0}{W} = \frac{4,37 \cdot 10^7}{18833} = 2320 \text{ кгс/см}^2.$$

При всех трех положениях максимальные напряжения ниже расчетных. Для укладки 1 км трубопровода по приведенной схеме для его балластировки потребуется 487 м$^3$ бетона с объемной массой 2,3 т/м$^3$.

П р и м е р 4. Погружение трубопровода с заливом водой и приложением растягивающего усилия.

Консольный изгиб

Определим, на какую величину следует уменьшить изгибающий момент в трубопроводе, чтобы изгибные напряжения в нем не превышали расчетных. Пренебрегая продольными напряжениями от растягивающего усилия на основании формулы (9), получим:

$$M_T = M_0 - \sigma_{расч.} \cdot W,$$

где $M_0$ – максимальный изгибающий момент, возникающий в трубопроводе при укладке по схеме I;

$\sigma_{расч}$ расчетное значение напряжений, определенное по формуле (37),

$$M_T = 0,66 \times 10^8 - 2600 \times 18833 = 0,17 \times 10^8 \text{ кгс.см}.$$

Зная угол $\beta$ (см.рис.15), под которым прикладывают растягивающее усилие к трубопроводу, по формуле (8) можно определить величину этого усилия:

$$T = \frac{M_T}{h \cos\beta + 0,65\, C \sin\beta},$$

где $C$ – полная длина изогнутого участка трубопровода, определяемая по формуле (6), (5):

$$C = n \sqrt[4]{\frac{6hEJ}{\omega}} \cdot \sqrt[4]{\frac{4}{2n^3 - 3n^2 + 1}};$$

$$C = 2,56 \sqrt[4]{\frac{6 \times 1200 \times 2,1 \times 10^6 \times 1148807}{11,05}} \cdot \sqrt[4]{\frac{4}{2 \times 2,56^3 - 3 \times 2,56^2 + 1}} =$$

$$= 11590 \text{ см}.$$

При $\beta = 20^0$

$$T = \frac{0,17 \times 10^8}{1200 \times 0,939 + 0,65 \times 11590 \times 0,342} = 4600 \text{ кгс}.$$

При консольном погружении трубопровода и его натяжении усилием 4,6 тс напряжения в нем не превысят расчетных. Продольным напряжением ввиду его малости можно пренебречь.

*S* -образный изгиб

Максимальный изгибающий момент в трубопроводе при его натяжении в процессе укладки уменьшается на величину, определяемую по формуле (I4).

При натяжении трубопровода усилием I60 тс эта величина составит:

$$M_T = 0{,}2\,T\sqrt{\frac{h}{EJ\omega}}\left(1-\frac{Th^2}{7{,}5EJ}\right)M_0' =$$

$$= 0{,}2\times 1{,}6\times 10^5\sqrt{\frac{1200}{2{,}1\times 10^6\times 1148807\times 11{,}05}}\cdot\left(1-\frac{1{,}6\times 10^5\times 1200^2}{7{,}5\times 2{,}1\times 10^6\times 1148807}\right)\times$$

$$\times\, 0{,}565\times 10^8 = 0{,}121\times 10^8\ \text{кгс}\cdot\text{см},$$

где $M_0'$ – максимальный изгибающий момент на участке *б* при укладке трубопровода заливом воды без натяжения по схеме I.

Максимальные продольные напряжения в трубопроводе находим по формуле (9):

$$\sigma = \frac{M_0 - M_T}{W} + \frac{T}{F} = \frac{0{,}565\times 10^8 - 0{,}121\times 10^8}{18833} + \frac{160000}{635} = 2609\ \text{кгс/см}^2.$$

При укладке трубопровода диаметром I220 мм на глубину I2 м заполнением водой без применения понтонов к нему необходимо прикладывать растягивающее усилие не менее I60 тс. Для уменьшения растягивающего усилия трубопровода можно частично разгрузить понтонами или дополнительно забалластировать.

Следует отметить, что формула (I5) дает завышение значения необходимого растягивающего усилия. Для более точного определения напряженно-деформированного состояния трубопровода при укладке следует пользоваться методикой, изложенной в Руководстве [6].

Приложение П

## ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ ТРУБОПРОВОДОВ ПО ПРОГРАММАМ ГЕК-I, ГЕК-2 и ГЕМ

На рис.2I показаны конфигурация изогнутой оси и распределение изгибных напряжений в трубопроводе диаметром 529 мм с толщиной стенки I0 мм, полученные расчетом по программе ГЕК-I и ГЕК-2. Плеть трубопровода длиной 300 м погружается на глубину 45 м при различных значениях растягивающего усилия.

В табл.5 даны значения исходных параметров, принятых в расчете для данного примера, и указаны их обозначения, принятые в программах.

На рис.22 показан график зависимости максимальных продольных напряжений, возникающих на нижнем участке изгиба в трубопроводе диаметром 529 мм с толщиной стенки I0 мм от глубины укладки при различных усилиях натяжения. Вычисления выполнены по указанным программам с исходными данными, приведенными в табл.5.

Максимальные продольные напряжения определены с учетом напряжений изгиба и продольных напряжений от растягивающего усилия.

Форму изогнутой оси трубопровода и распределение напряжений в нем при погружении концевого участка плавающей плети определяют по программе ГЕМ.

В качестве примера на рис.23 приведены рассчитанные по программе перемещения и напряжения в трубопроводе диаметром 529 мм при различных глубинах погружения его концевого участка. Исходные данные приняты по табл.5. На рис.23 показаны отметки уровня воды, залитой в трубопровод, на различных этапах его погружения.

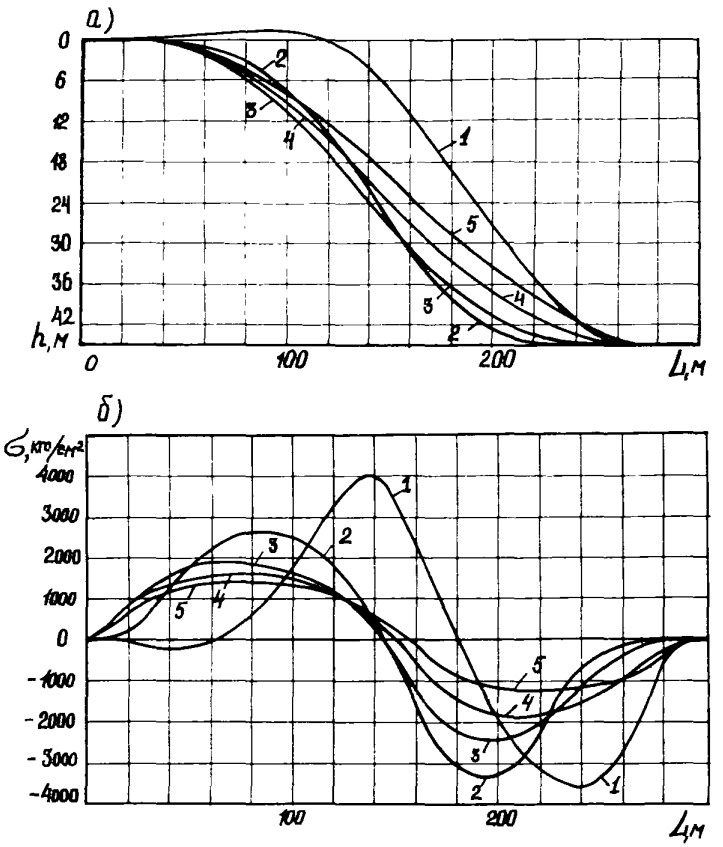


Рис.21. Конфигурация изогнутой оси трубопровода диаметром 529 мм с толщиной стенки 10 мм (а) и распределение изгибных напряжений в нем (б)при погружении на глубину 45 м при различных значениях растягивающего усилия Т:

1 – Т = 0; 2 – Т = 10 тс; 3 – Т = 20 тс; 4 – Т = 30 тс; 5 – Т = 40 тс

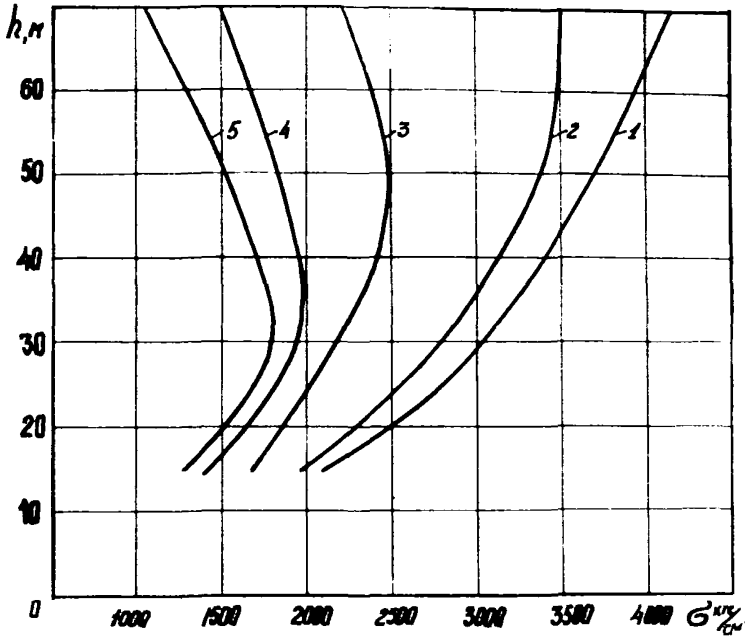


Рис.22. Зависимость максимальных продольных напряжений на нижнем участке изгиба в трубопроводе диаметром 529 мм с толщиной стенки 10 мм от глубины укладки при различных усилиях натяжения Т:

1 - Т = 0; 2 - Т = 10 тс; 3 - Т = 20 тс; 4 - Т = =30 тс; 5 - Т = 40 тс

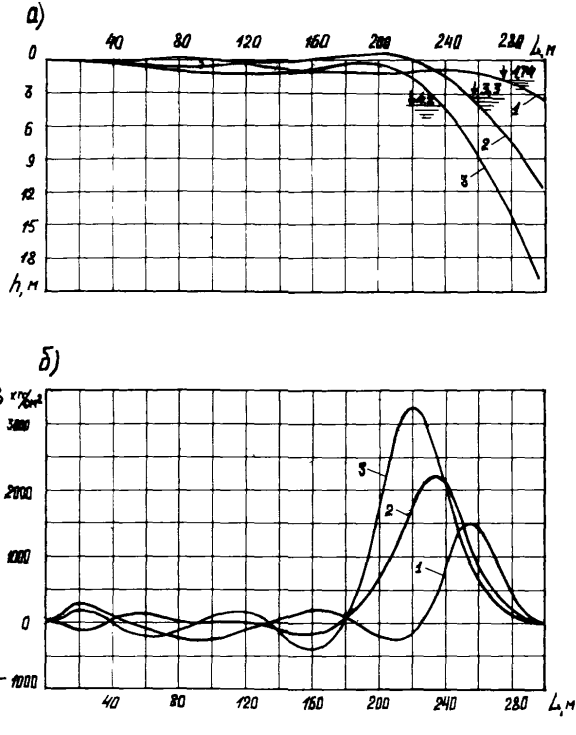


Рис.23. Конфигурация изогнутой оси (а) и распределение изгибных напряжений (б) в трубопроводе при погружении его концевого участка на различные глубины $h$ :
I - $h$ = 4 м; 2 - $h$ = II,7 м; 3 - $h$ = I9,8 м

Таблица 5

| Наименование исходных параметров и их обозначение | Действительное значение параметра | Значение безразмерного параметра |
|---|---|---|
| Число участков, на которое разбита по длине рассматриваемая плеть трубопровода $N$ | 130 | 130 |
| Длина плети трубопровода $L$ | 300 м | 1 |
| Наружный диаметр трубопровода с изоляцией, слоем бетона и т.п. $D_н$ | 590 м | 0,0018 |
| Глубина акватории $H$ | | |
| Отношение массы воды $m_ж$, заполняющей трубопровод при заливе на единицу длины трубопровода, к массе $m$ единице длины (пустого) трубопровода $\beta$ | 1,2 | 1,2 |
| Масса оснащенного трубопровода на единицу длины $P_0$ | 1,68 кг/см | 400 |
| Выталкивающая сила воды на единицу длины трубопровода $Q$ | 2,7кг/см | 630 |
| Коэффициент постели грунтового основания на единицу длины трубопровода $C$ | | |
| Коэффициент искусственной вязкости $\varepsilon$ | - | 1000 |
| Коэффициент трения трубопровода о дно $F_{тр}$ | 0,5 | 0,5 |
| Максимальное значение растягивающего усилия, прикладываемого к трубопроводу на верхнем конце $T_{max}$ | 40 тс | 312 |
| Шаг значений внешнего усилия для вывода на печать перемещений и усилий в трубопроводе $T_п$ | 10 тс | 78 |
| Отношение шага по времени к шагу по координате $\alpha$ | 0,8 | 0,8 |

## ЛИТЕРАТУРА


I. Рекомендации по технологии укладки подводных трубопроводов диаметром 1220 и 1420 мм, Р 126-72, М., ОНТИ ВНИИСТа, 1973, с.83.

2. Рекомендации по технологии прокладки морских трубопроводов, Р 125-72, М., ОНТИ ВНИИСТа, 1973, с.107.

3. Временные указания по технологии и организации строительства подводных переходов магистральных трубопроводов в зимних условиях, М., ОНТИ ВНИИСТа, 1968 г., с.111.

4. Указания по производству работ при сооружении магистральных стальных трубопроводов. Строительство подводных переходов. Вып.9, ВСН-1-20-70, М., ОНТИ ВНИИСТа, 1971 г., с.45.

5. Левин С.И. Проектирование и строительство подводных трубопроводов, М., Гостоптехиздат, 1960 г., с.334.

6. Руководство по методам расчета подводных трубопроводов при погружении на большие глубины, Р-294-77, М., ЦНТИ ВНИИСТа , 1978 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение ..... 3
I. Общие положения ..... 5
2. Монтаж трубопровода и подготовка его к укладке ..... 7
3. Способы погружения подводных трубопроводов ..... 12
4. Укладка трубопроводов с приложением растягивающего усилия ..... 22
5. Расчеты трубопроводов при их укладке .... 31
Расчеты трубопроводов, укладываемых на малые глубины ..... 32
Расчеты трубопроводов, укладываемых на большие глубины ..... 44
Суммарные напряжения в трубопроводе и проверка прочности ..... [illegible]
Приложения ..... 49
Литература ..... 4

---

Руководство

по технологии укладки подводных трубопроводов способом свободного погружения с приложением растягивающего усилия

Р 315-78

Издание ВНИИСТа

Редактор Т.Я.Разумовская Корректор С.П.Михайлова

Технический редактор Т.В.Берешева

Л-[illegible]53545 Подписано в печать 17/VI 1980 г. Формат 60х84/16
Печ.л. [illegible] Уч.-изд.л. 3,4 Бум.л. 2,0
Тираж 20[illegible] экз. Цена 34 к. Заказ 63

Ротапринт ВНИИСТа (Перепечатка)

gost.e-ecolog.ru