МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ
НЕФТЯНОЙ И ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ
ВНИИСТ

РЕКОМЕНДАЦИИ

ПО ТЕХНОЛОГИИ ПРОКЛАДКИ МОРСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

Р 125-72



gost.e-ecolog.ru

Москва 1973

МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ
НЕФТЯНОЙ И ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ
ВНИИСТ

РЕКОМЕНДАЦИИ

ПО ТЕХНОЛОГИИ ПРОКЛАДКИ МОРСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

Р 125-72

Отдел научно-технической информации

Москва 1973

УДК 622.692.47(204.I)

Рекомендации содержат основные положения по технологии укладки подводных морских газонефтепроводов.

В Рекомендациях рассмотрены технологические процессы укладки стальных морских газонефтепроводов, пересекающих морские акватории, а также нефтепроводов, прокладываемых в системе морских рейдовых нефтепричалов.

Технология и организация сварочных, изоляционных работ, испытания трубопроводов, а также водолазные, берегоукрепительные и другие работы, выполняемые при строительстве морских трубопроводов, в данных Рекомендациях не рассмотрены.

Рекомендации разработаны на основании изучения опыта строительства морских трубопроводов строительными организациями министерств газовой и нефтяной промышленности, Министерства речного флота, а также зарубежного опыта строительства.

Рекомендации предназначены для организаций Министерства строительства предприятий нефтяной и газовой промышленности, занимающихся разработкой проектов производства работ и строительством подводных морских трубопроводов.

Рекомендации составлены сотрудниками ВНИИСТа канд.техн. наук Левиным С.И. (руководитель темы) и инж. Крупкиным Б.Н. (ответственный исполнитель) при участии инженеров Ратнера А.Г. и Егоровой А.А.

Замечания и предложения по Рекомендациям просьба направлять по адресу: Москва, Е-58, ВНИИСТ, Лаборатория технологии и организации строительства.

ВВЕДЕНИЕ

Перспективы развития строительства подводных трубопроводов на морских шельфах определяются запасами нефти и газа на морских месторождениях и системой их обустройства, в этом случае подводные трубопроводы служат для транспорта нефти и газа от скважин к сборным пунктам и перекачки продукта к берегу.

В Советском Союзе площадь газоносных районов шельфа по предварительной оценке в 1970 г. составляла 3 млн. км^2. В районах Калининградской области и в Латовской ССР на шельфе Балтийского моря выявились перспективы для поиска нефтяных и газовых месторождений. Перспективными по запасам газа являются шельфовые зоны Охотского моря вокруг о.Сахалин и северных морей, прилегающих к районам Коми АССР, Западной и Восточной Сибири. По предварительным оценкам, запасы газа в шельфах северных морей составляют около 10 трлн.м^3. Запасы газа на шельфах Азовского моря оцениваются в 1 трлн.м^3. Не менее перспективны акватории Черного моря, прилегающие к западной части Крымского полуострова, а также большая часть акватории Каспийского моря.

В настоящее время в Советском Союзе построены на побережье Каспийского моря нефтегазопроводы диаметром до 400 мм, предназначенные для подачи нефти и газа с морских месторождений на берег. На побережье Тихого океана, Черного и Балтийского морей построены подводные трубопроводы в системах водоснабжения и сброса сточных вод.

Проектирование и строительство морских трубопроводов существенно отличается от проектирования и строительства речных переходов магистральных трубопроводов.

Внесены ЛТОС	Утверждены ВНИИСТом 24 ноября 1972 г.	Разработаны впервые

Учитывая специфические условия строительства морских трубопроводов, следует предъявлять особые требования к инженерным изысканиям, которые необходимы для определения:

геологического строения и рельефа дна;

нагрузок и воздействий на трубопровод при строительстве и эксплуатации;

оптимального направления трассы трубопровода;

наиболее рациональных конструктивных решений;

технологических процессов строительства.

В связи с этим в Рекомендациях приведены состав и основные требования к инженерным изысканиям при строительстве морских трубопроводов.

Основными способами укладки морских трубопроводов в СССР являются: протаскивание по дну и свободное погружение предварительно буксируемых плетей. Эти два способа, проверенные на практике строительства, можно применять с использованием имеющегося оборудования и существующих методов расчета напряженного состояния укладываемого трубопровода.

За рубежом (США, Франция, Япония и в других странах) широкое развитие строительства морских трубопроводов обусловлено быстрым ростом морской нефтедобычи. Известны примеры укладки нефтегазопроводов значительной протяженности на глубины 100 м и больше. Разработано несколько различных способов укладки морских трубопроводов: с трубоукладочной баржи; методом J-образной кривой; методом сматывания с барабана, установленного на барже.

Способ укладки трубопровода с трубоукладочной баржи методом последовательного наращивания, получивший широкое распространение в США, является наиболее перспективным. Приведенная в Рекомендациях технология укладки трубопровода данным способом основана на зарубежном опыте строительства. Расчеты основных параметров при укладке трубопровода с трубоукладочной баржи выполнены теоретически с определенными допущениями. Эти расчеты требуют проверки в натурных условиях и могут быть использованы при проектировании нового оборудования для укладки трубопроводов.

Обобщение опыта строительства морских трубопроводов позволяет дать классификацию различных способов укладки и указать

область их применения. Это поможет проектным и строительным организациям выбирать наиболее рациональный способ укладки трубопровода в зависимости от его назначения и конкретных условий строительства.

Настоящие Рекомендации по технологии прокладки морских трубопроводов разработаны впервые и будут уточняться по мере накопления опыта строительства, внедрения нового оборудования для укладки морских трубопроводов и его опытной проверки на строительстве.

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.I. В проекте морского трубопровода должны быть определены:

конструкция трубопровода;

участки, на которых трубопровод должен быть заглублен в дно;

величина заглубления.

В проекте организации строительства, в зависимости от конструкции и расчетного веса трубопровода должны быть обоснованы:

способ заглубления трубопровода и необходимое оборудование;

способ укладки трубопровода с расчетом его напряженного состояния и необходимое оборудование.

I.2. Проект производства работ должен включать детальную технологическую схему укладки трубопровода, разрабатываемую на основании следующих исходных материалов:

утвержденного проекта морского трубопровода;

материалов инженерных изысканий;

анализа и расчета нагрузок и воздействий их на трубопровод при укладке.

I.3. Основными особенностями строительства морских трубопроводов, которые необходимо учитывать при разработке технологии их укладки, являются:

гидрометеорологические условия, которые требуют применения специальных плавучих средств и оборудования;

быстрое изменение гидрометеорологических условий, из-за которых могут быть остановлены работы по укладке трубопровода;

необходимость предусматривать безопасные условия работ и

отстой плавтехсредств при возникновении штормовой погоды;

сложность ликвидации аварий трубопровода при укладке его на большие глубины;

быстрая заносимость прибрежных траншей даже при небольшом волнении.

I.4. Организация, выполняющая строительство морского трубопровода, должна дважды в течение дня получать прогноз погоды и метеосводки для района строительства. Сигнал о наступлении штормовой погоды должен быть немедленно доведен до сведения всего личного состава, занятого на укладке трубопровода.

I.5. Все плавучие и технические средства, занятые на укладке трубопровода, должны быть обеспечены двухсторонней радиосвязью с центральным постом ответственного производителя работ по укладке трубопровода.

I.6. Суммарные напряжения в трубопроводе при его укладке не должны превышать 75% от предела текучести.

I.7. Плавучие технические средства допускается использовать при укладке трубопровода при волнении до 3-4 баллов и силе ветра до 4 баллов (по шкале Бофорта).

I.8. Запрещается использовать при укладке морских трубопроводов плавучие технические средства, не имеющие разрешения Морского регистра СССР на выполнение работ в районе строительства.

I.9. Так как в морских условиях сложно ликвидировать аварию трубопровода, то при его укладке следует осуществлять строгий пооперационный контроль.

Непосредственно перед укладкой необходимо проверить:

грузоподъемность и прочность понтонов и устройства по их отстропке;

вес трубопровода в воздухе и под водой;

величину тягового усилия;

грузоподъемность плавучих кранов и лебедок;

прочность тросов и такелажа.

I.10. При укладке подводных трубопроводов на большие глубины необходимо выполнить расчет трубопровода на потерю устойчивости кольцевого поперечного сечения с учетом гидростатического давления и изгиба [I].

Понтоны, применяемые для укладки трубопроводов на большие глубины, должны быть также рассчитаны на потерю устойчивости с учетом гидростатического давления.

I.II. При прокладке трубопровода, имеющего бетонное покрытие, необходимо точно определить вес трубопровода под водой или величину его отрицательной плавучести.

Вес трубопровода с бетонным покрытием слагается из веса стальной трубы, антикоррозийной изоляции и бетонного покрытия. Веса стальной трубы и изоляции изменяются незначительно и могут быть достаточно точно установлены путем измерения толщины стенок трубы и изоляционного покрытия.

При определении веса бетонного покрытия и соответственно отрицательной плавучести трубопровода следует учитывать три основных фактора:

объемный вес бетона;

толщину бетонного покрытия;

количество теряемой и поглощаемой бетоном воды за время с момента нанесения покрытия до окончания укладки трубопровода (водопоглощение).

I.I2. При укладке трубопроводов значительной протяженности способом протаскивания, а также при укладке трубопроводов способом свободного погружения или с трубоукладочных барж расчетная величина отрицательной плавучести может составлять I5-30 кг/м. При таких значениях отрицательной плавучести следует предъявлять очень жесткие требования к проектированию и полевому контролю за толщиной бетонного покрытия, его объемным весом и водопоглощением.

I.I3. Незначительное изменение объемного веса бетона соответствует большому изменению плавучести трубопровода.

На графике (рис.I) приведены кривые, характеризующие изменение отрицательной плавучести газопроводов (Π) в зависимости от изменения объемного веса бетонного покрытия ($\delta_{бет}$) для трубопроводов диаметром 529 мм с бетонным покрытием толщиной 56,5 мм и диаметром I220 мм с бетонным покрытием толщиной I44 мм.

При увеличении диаметра подводного трубопровода возрастает влияние объемного веса бетона на плавучесть трубопровода.

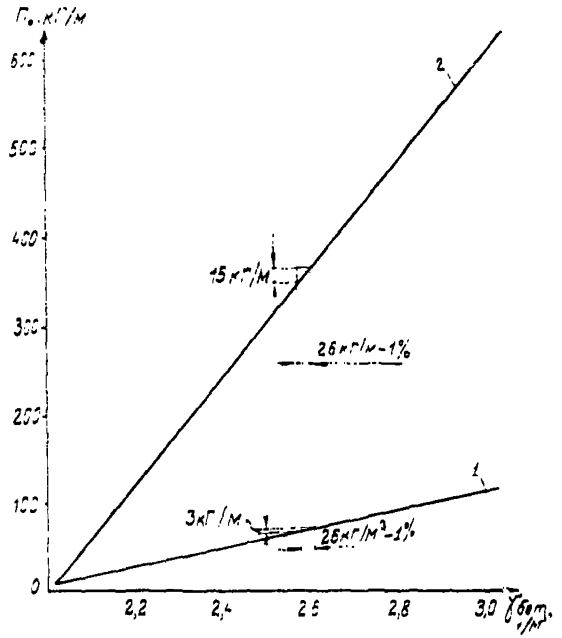

Рис.I. Зависимость отрицательной плавучести трубопровода от объемного веса бетонного покрытия:
I-трубопровод диаметром I220 мм; 2-трубопровод диаметром 529 мм

Как показано на рис.I отрицательная плавучесть трубопровода диаметром 529 мм изменится на 3 кГ/м при изменении объемного веса бетона на I% для покрытия с расчетным объемным весом бетона 2600 кг/м^3, и плавучесть трубопровода диаметром I220 мм изменится на I5 кГ/м при таком же изменении объемного веса бетонного покрытия.

I.I4. Незначительное изменение толщины бетонного покрытия и наружного диаметра трубопровода с покрытием вызывает большое изменение отрицательной плавучести трубопровода.

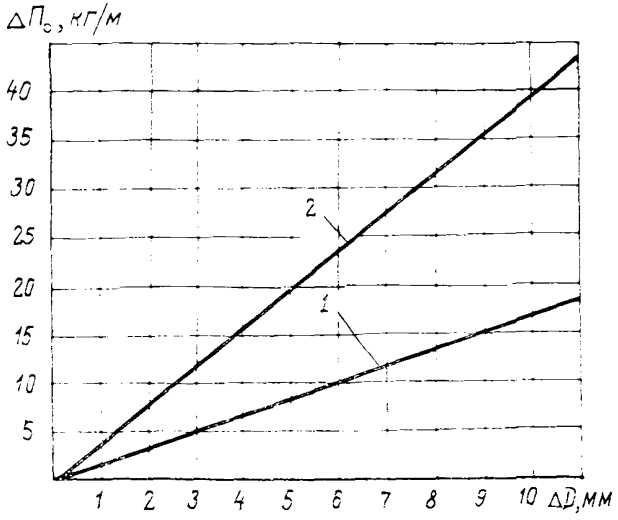

Рис.2. Зависимость увеличения отрицательной плавучести трубопровода от изменения наружного диаметра бетонного покрытия:

I-трубопровод диаметром 529 мм; 2-трубопровод диаметром I220 мм

На рис.2 приведены кривые, характеризующие зависимость увеличения отрицательной плавучести трубопроводов ($\Delta П_с$) от изменения наружного диаметра бетонного покрытия (ΔD) для трубопровода диаметром 529 мм с бетонным покрытием толщиной 56,5 мм и диаметром I220 мм с бетонным покрытием толщиной I44 мм при объемном весе бетона 2600 кг/м^3.

С увеличением диаметра трубопровода возрастает влияние изменения наружного диаметра трубы с бетонным покрытием на величину отрицательной плавучести трубопровода.

Примечание. Увеличение на I% или на 6,6 мм наружного диаметра бетонного покрытия для трубы диаметром 529 мм соответствует увеличению отрицательной плавучести на II кГ/м, для трубы диаметром I220 мм увеличение наружного диаметра на 0,5% или на 7,6 мм соответствует увеличению отрицательной плавучести на 30 кг/м (как показано на рис.2).

Следовательно, при нанесении бетонного покрытия на трубопровод необходимо соблюдать строгие допуски к толщине бетонного покрытия.

Контроль за величиной наружного диаметра трубопровода с покрытием рекомендуется вести путем измерения длины его окружности в пяти сечениях для каждой трубы.

I.I5. Опытными данными установлено, что теоретический объемный вес бетона (определенный в проекте по суммарному весу компонентов, использованных при изготовлении бетона) очень близок к фактическому объемному весу увлажненного бетона.

Контроль замесов бетона в полевых условиях позволяет сравнить объемный вес бетона, поступающего в опалубку, с теоретическим объемным весом; эти объемные веса должны быть одинаковые.

Контроль замесов бетона позволит с достаточной точностью регулировать объемный вес бетона и заданную (расчетную) отрицательную плавучесть трубопровода.

2. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ИНЖЕНЕРНЫМ ИЗЫСКАНИЯМ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МОРСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ

2.1. Основные требования к инженерным изысканиям необходимы для разработки, технологии и организации строительства нефтегазопроводов, пересекающих морские акватории, а также прокладываемых в системе морских рейдовых нефтепричалов.

Специальные требования к инженерным изысканиям для строительства трубопроводов в системах морского водоснабжения и морских выпусков в настоящих Рекомендациях не приведены.

2.2. Состав и объемы инженерных изысканий устанавливают для определения:

геологического строения и рельефа морского дна по возможным створам трубопровода;

нагрузок и воздействий на трубопровод при строительстве и эксплуатации;

оптимального направления створа (трассы) трубопровода;

наиболее рациональных конструктивных и проектных решений;

технологических процессов строительства;

затрат на строительство трубопровода.

2.3. Для получения данных, указанных в п.2.2, инженерные изыскания должны характеризовать природные условия в районе прокладываемого трубопровода.

К природным условиям, которые необходимо учитывать при проектировании, строительстве и эксплуатации подводного трубопровода, относятся:

топографические и гидрографические условия, характери-

зующие очертания береговой линии, рельеф морского берега и дна в прибрежной зоне и по трассе трубопровода;

геологические и геоморфологические условия (геологическое строение дна, минералогический состав грунтов, их физико-механические свойства, движение наносов, деформация берега и дна);

метеорологические условия (ветер, туманы, осадки, температура воздуха);

гидрологические условия (колебания уровня воды, приливы и отливы, волнение, направления и скорости течения, ледовый режим);

гидрофизические, гидрохимические и гидробиологические условия, включающие данные о температуре, химическом составе и физических свойствах морской воды, жизнедеятельности живых организмов и их воздействии на покрытия трубопроводов.

2.4. В результате инженерных изысканий определяют следующие нагрузки и воздействия, учитываемые при проектировании, строительстве и эксплуатации подводных трубопроводов:

вес и плавучесть трубопровода;

инерционные и скоростные компоненты волнового давления;

гидростатическое давление;

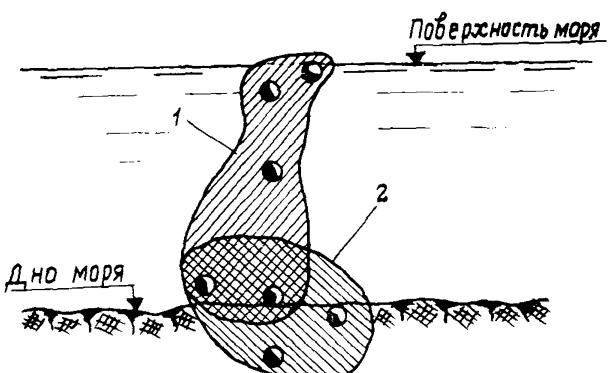

Рис.3. Различные положения подводного трубопровода при строительстве и эксплуатации, определяющие внешние воздействия:

I-при строительстве; 2-при эксплуатации

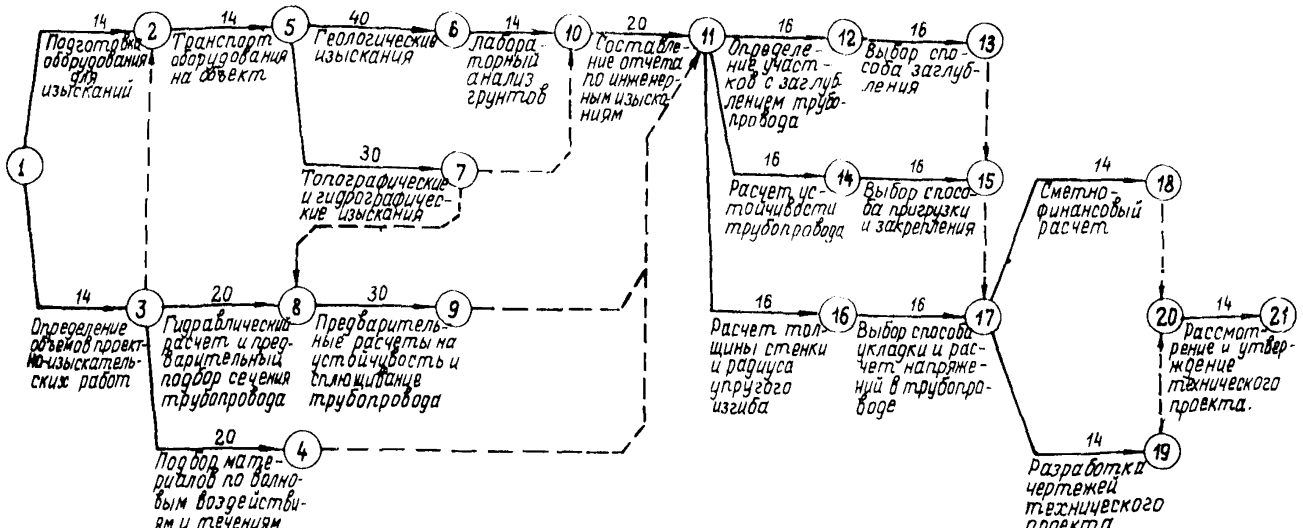

Рис.4. Примерный сетевой график организации проектно-изыскательских работ для сооружения морского трубопровода (технический проект)

взаимодействие грунта основания с трубопроводом при различных состояниях грунта;

силы трения на трубопровод при его укладке.

Инженерные изыскания должны определять возможные воздействия на трубопровод при его строительстве и эксплуатации. Эти воздействия зависят от положения трубопровода относительно уровня моря и поверхности дна при строительстве и эксплуатации (рис.3).

2.5. Инженерные изыскания, необходимые для сооружения подводных трубопроводов в системе морских рейдовых нефтепричалов, следует выполнять одновременно со съемкой и выбором участка побережья под береговые сооружения нефтебазы, так как в некоторых случаях создаются условия, благоприятные для размещения этих сооружений (рельеф берега, подъездные пути и другие), но не соответствующие оптимальным условиям строительства подводных трубопроводов и рейдового оборудования.

2.6. Проектно-изыскательские работы весьма трудоемки, в связи с этим необходима четкая организация их выполнения.

На рис.4 приведен примерный сетевой график выполнения проектно-изыскательских работ по составлению технического проекта морского трубопровода.

ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ И ГИДРОГРАФИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ

2.7. Топографические и гидрографические (промерные) работы необходимы для:

выбора створа (трассы) морского трубопровода;

размещения строительной площадки, складских, жилых и культурно-бытовых помещений, подъездных путей, стапелей для монтажа и спусковых устройств для укладки трубопроводов, временных причальных устройств для стоянки плавучих технических средств;

разработки технологии и выбора оборудования для выполнения земляных работ и укладки трубопровода.

2.8. При выполнении топографических работ следует определить:

расположение карьеров для получения местных строительных материалов;

места имеющихся причалов и подъездных путей;

места закрытых стоянок для стотоя плавучих средств;

способ транспортировки материалов и оборудования, необходимых при строительстве;

места отвалов грунта (при рытье траншей на портовых акваториях).

2.9. В результате выполнения топографических и гидрографических работ должны быть составлены следующие материалы:

план акватории, включающий район строительства в масштабе I:I0000 - I:25000 (из имеющихся морских карт) с нанесенными на нем створами трубопроводов, инженерными сооружениями, судовыми ходами, обстановкой и местами стоянки судов и отвалов грунта;

совмещенный план участка акватории и прибрежной территории, составляемый по материалам топографической съемки и гидрографических работ;

продольные профили по возможным вариантам створов подводных трубопроводов;

пояснительная записка, включающая данные, указанные в пп.2.7 и 2.8 настоящих Рекомендаций.

2.I0. План участка акватории, на котором надлежит выполнить промерные работы, устанавливают после предварительного расчета длины морского трубопровода.

Масштаб плана участка акватории I:I000 - I:2000 с линиями равных глубин (изобатами) через 0,5-I,0 м в зависимости от сложности рельефа и масштаба.

2.II. Масштаб плана прибрежной территории должен соответствовать масштабу участка акватории с горизонталями через 0,5-I,0 м в зависимости от крутизны берега.

Ширину полосы съемки следует принимать не менее чем на 200 м в каждую сторону от крайних возможных створов трубопровода.

На плане должны быть показаны:

предполагаемые створы трубопроводов на берегу и подводные трассы с плановыми привязками;

все имеющиеся сооружения, буровые скважины с указанием их номеров;

расположение реперов.

2.I2. Планы участка акватории и прибрежной территории должны быть выполнены в одинаковом масштабе, вычислены относительно одного и того же отсчетного (нулевого) уровня и иметь плановую и высотную привязки.

Показанные на плане варианты створов подводных трубопроводов, обозначенные створными знаками, привязывают к основной разбивочной магистрали на суше и закрепляют реперами, которые устанавливают за пределами раскрытия береговых траншей.

2.I3. При выполнении инженерных изысканий для строительства трубопровода морского рейдового нефтепричала план акватории должен включать участок с выходом на глубину до 50 м, но не менее чем на 500 м от конца подводного трубопровода. На этом плане должно быть указано положение поперечных профилей, нормальных к продольной оси (створу) подводного трубопровода. На основании поперечных профилей в конце подводного трубопровода и дальше в море проектируют расстановку рейдового оборудования.

2.I4. На продольных профилях, построенных по предполагаемым створам трубопроводов, должно быть указано расстояние (пикетаж) от основной разбивочной магистрали. Горизонтальный масштаб продольного профиля должен соответствовать масштабу плана, вертикальный масштаб продольного профиля следует принимать I:I00 - I:200.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ

2.I5. При проектировании и строительстве подводного трубопровода геологические изыскания необходимы для определения:

величины заглубления подводного трубопровода в грунт морского дна и на береговом участке;

способа и оборудования, необходимых для заглубления подводного трубопровода;

степени деформации морского дна и прибрежной полосы при штормовой погоде;

конструкции крепления берега;

условий, при которых возможна потеря устойчивости подводного трубопровода в строительный период и при эксплуатации;

конструктивных решений для закрепления трубопровода.

2.16. При выполнении геологических изысканий следует определить структуру грунтовых отложений по трассе подводного трубопровода.

Кроме того, необходимо знать характеристику грунтов для определения держащей силы судовых якорей на расстоянии 200-500 м дальше от головного конца трубопровода , а также на участке 50-300 м (в зависимости от глубины моря) в стороны от оси трубопровода.

На основании геологических изысканий составляют характеристику верхнего слоя грунта толщиной, равной величине последующего заглубления трубопровода с запасом не менее чем на 2 м для мягких грунтов.

При выдаче заданий на геологические изыскания следует учитывать, что обычно заглубление морского трубопровода по длине трассы в зависимости от местных условий можно проектировать при глубинах моря 10-15 м и больше, а величина заглубления, считая от верха трубопровода, в мягких (нескальных) грунтах, принимается 2-3 м (в зависимости от характера грунта морского дна и возможных его деформаций).

Непосредственно около берега на участке действия разбитой волны величина заглубления трубопровода обычно увеличивается, что следует учитывать при отборе кернов и взятии проб грунта.

2.17. Материалы геологических изысканий должны содержать данные о структуре и плотности ненарушенной породы, гранулометрическом составе, физических свойствах (объемный вес, пористость, угол естественного откоса), а также по движению наносов, эрозии морского берега и возможным оползневым явлениям.

В результате лабораторных исследований образцов грунта должны быть получены следующие данные:

сопротивление грунта срезу;
содержание воды;
объемный вес естественной структуры и скелета;
гранулометрический состав;
влажность;
предел текучести (липкости для глины);
пластичность;
влажность нижнего предела пластичности.

В пояснительной записке к инженерным изысканиям следует указать группу грунта, наиболее оптимальный и возможные способы разработки траншей, а также условия перехода грунтов в жидко-пластичное состояние (при волнении,размыве, засыпке траншей).

2.18. По результатам выполненных геологических изысканий строят продольные профили по возможным вариантам створов подводных трубопроводов. На профили, по данным лабораторного анализа, наносят номера колонок (буровых скважин) с характеристиками грунта. Плановое расположение колонок (скважин) указывают на плане участка акватории.

2.19. Для более точной геологической характеристики района строительства трубопровода целесообразно составить несколько планов одного и того же участка акватории, на которых указаны характеристика грунтов (в принятых условных обозначениях) у поверхности дна моря на глубине I м ниже поверхности дна и на глубине 2 м ниже поверхности дна моря.

Сопоставление таких планов значительно облегчает выбор рационального створа, а также решение других вопросов при проектировании и строительстве подводного трубопровода.

2.20. Материалы геологических изысканий должны включать данные о поперечных и продольных перемещениях наносов, изменениях плотности и водонасыщения грунтов при возможном переходе их в разжиженное состояние на участках с разбитой волной.

Переход грунта в текучее состояние может привести к потере устойчивости заглубленного трубопровода и всплытию его к поверхности дна.

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ

2.21. Метеорологические изыскания необходимы для получения исходных данных для составления проекта организации строительства трубопровода и проекта производства работ.

Характеристика ветрового режима определяет положение рейдового оборудования и условия его эксплуатации.

Для характеристики ветрового режима района необходимы следующие данные:

скорость и направление ветра;

повторяемость ветра по скорости и направлению;

продолжительность ветра с постоянной скоростью и длины разгона.

Эти данные могут быть получены на метеостанции, ближайшей к району строительства, и представлены диаграммами - розами ветров.

Для разработки проекта производства работ по строительству подводного трубопровода необходимы диаграммы повторяемости ветра по направлению и скорости.

Розу ветров по сезонам года следует строить по многолетним наблюдениям, что дает возможность прогнозировать ветровой режим на период строительства и эксплуатации.

Ветровые условия при штормовой погоде являются исходными для расчета элементов волны, учитываемых при проектировании.

Метеорологические изыскания должны включать сведения о температуре воздуха, которую следует учитывать при строительстве, особенно на побережьях северных морей.

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗЫСКАНИЯ

2.22. Приливно-отливные колебания уровня моря следует учитывать при подводных земляных работах и укладке трубопровода. На участках с незначительными глубинами моря при отливе выполнение этих работ лимитируется осадкой плавучих технических средств.

2.23. Волнение моря является одним из основных факторов, определяющих конструкцию трубопровода и условия его строительства.

В результате гидрологических изысканий должны быть получены расчетные параметры волн для трех волновых зон (2) (рис.5) по намеченным створам трубопроводов.

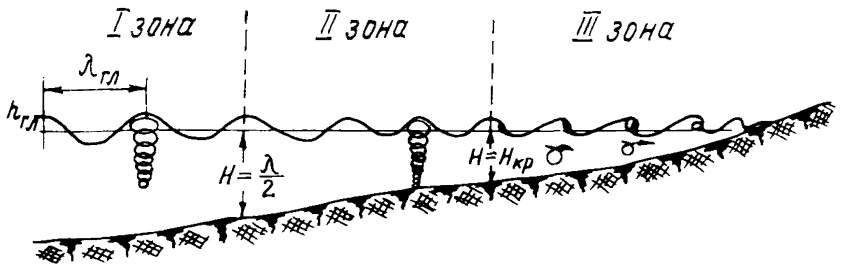

Рис.5. Волновые зоны на мелководье:
$h_{гл}$ -высота волн на глубокой воде; $\lambda_{гл}$-длина волн на глубокой воде; $H_{кр}$-глубина первого забурунивания волн

Для расчета волновых воздействий на трубопровод необходимы данные о величине волн в различные периоды года и соответствующие штормам, наблюдаемым в течение I года, 20 лет и I00 лет.

Для строительства трубопровода необходимы данные о величине волн в предполагаемые периоды строительства (например, июль-сентябрь, декабрь-март). Эти данные, которые целесообразно представить в виде диаграммы - розы волнения, позволят определить количество рабочих дней и потери времени (простои) плавучих средств по метеорологическим причинам.

2.24. При проектировании морского трубопровода особое значение имеет определение протяженности III зоны, на которой будет разбита волна (с глубинами моря, меньшими критической глубины). Протяженность этой зоны зависит от глубины и высоты волн.

На плане участка акватории, построенного по гидрографическим изысканиям, следует показать границы зон разбитой волны при волнении, соответствующем максимальной интенсивности один

раз в год, один раз в 25 лет, один раз в 100 лет (рис. 6).

При проектировании трубопровода на этом участке следует учитывать неустойчивое состояние грунтов при воздействии разбитой волны и свойства грунта, в зависимости от этих факторов следует принимать решение о заглублении или закреплении трубопровода.

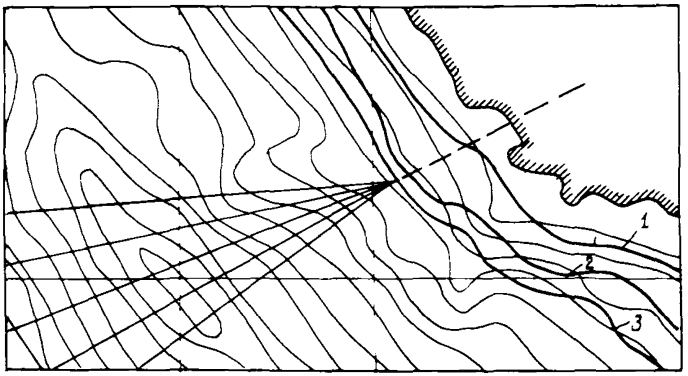

Рис.6. Зоны разбитой волны при волнении, соответствующем максимальной интенсивности:
1 - один раз в год; 2 - один раз в 25 лет; 3 - один раз в 100 лет

2.25. Данные о повторяемости волн целесообразно представлять в графической форме. (Например, из графика, приведенного на рис.7, следует, что волны высотой 0,9 м и больше имеют повторяемость 70% и волны с высотой 0,6 м и 1,5 м имеют одинаковую повторяемость 14%).

2.26. При проведении изысканий необходимо найти значения ветровых и приливно-отливных поверхностных и донных течений, которые воздействуют на трубопровод при укладке и на трубопровод, проложенный по дну. Эти данные необходимо использовать для расчета устойчивости подводного трубопровода и его напряженного состояния при укладке.

2.27. Материалы изысканий должны содержать сведения о плотности, температуре и прозрачности морской воды по временам

года. Плотность воды необходимо учитывать при расчетах устойчивости трубопровода, температуру и прозрачность - при выполнении водолазных работ.

2.28. Для разработки проектов производства работ необходимы следующие данные, характеризующие ледовый режим:

количество дней в году с ледовым покровом, определяемое по средним многолетним наблюдениям;

даты замерзания и вскрытия льда, его толщина и прочность;

возможность образования торосистых льдов;

направления движения ледяных полей;

деформации дна при перемещении льда.

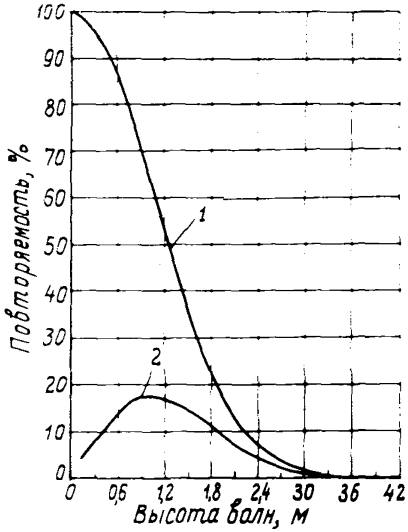

Рис.7. График повторяемости волн: 1-повторяемость волны высотой h и больше; 2-повторяемость волн определенной высоты

В некоторых случаях условия льдообразования определяют конструктивные решения (увеличение заглубления трубопровода на участках торошения льда, защита трубопровода от повреждения льдом).

2.29. Сведения о морской фауне должны включать данные о возможном воздействии организмов (моллюсков и ракообразных) на применяемые при строительстве материалы (пластмассовые и битумные покрытия, бетонные и стальные конструкции).

3. КЛАССИФИКАЦИЯ И ВЫБОР СПОСОБА УКЛАДКИ МОРСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

3.1. В настоящее время для укладки морских трубопроводов применяют следующие основные способы:

I способ – протаскивание трубопровода по дну или по предварительно разработанной траншее;

II способ – укладка трубопровода свободным погружением с предварительной буксировкой плетей;

III способ – укладка трубопровода с трубоукладочной баржи последовательным наращиванием;

IУ способ – укладка трубопровода сматыванием его с барабана, установленного на барже.

В табл.I приведены данные по укладке морских стальных трубопроводов способами, указанными в п.3.I [3-8] . Для различных диаметров приведены максимальные глубины укладки трубопроводов, их протяженность и место укладки.

3.2. Выбор способа укладки трубопровода зависит от следующих факторов:

природных условий в месте строительства;

диаметра, веса и марки стали трубопровода;

глубины моря;

длины укладываемого трубопровода;

наличия соответствующих технических средств в распоряжении строительной организации;

условий судоходства в районе строительства трубопровода.

Способ укладки трубопровода следует окончательно выбирать после технико-экономических сравнений различных возможных вариантов.

Таблица I

Способ укладки	Диаметр трубопровода, мм	Максимальная глубина укладки трубопровода, м	Протяженность трубопровода, км	Место укладки (производитель работ)
Протаскивание по дну тяговой лебедкой, установленной на барже	203	213	5,2	Пролив Пьюджет Саунд (США)
	762	48	30	Персидский залив (США)
	1320	-	18	Залив у г.Триеста (Италия)
Свободное погружение с буксировкой плетей:				
с понтонами постоянной плавучести	273	20	20	Каспийское море п-ов Челекен
	762	48	41	Персидский залив (США)
	1200	15	0,5	Черное море Ялта
с понтонами переменной плавучести и натяжением	194	300	13	Коринфский залив (Франция)
	244	2600	5	Средиземное море (Франция)
Укладка с трубоукладочной баржи	609	100	--	Мексиканский залив (США)
	710	41	147	Северное море (США)
	1220	25	23	Залив Бенин Нигерия (США)
Укладка трубопровода сматыванием с барабана, установленного на барже	100	107	-	Мексиканский залив (США)
	305	48	3,2	Мексиканский залив (США)

Примечание. В табл.I приведены данные на 1972 г.

3.3. Способ укладки трубопровода необходимо увязывать со способом его заглубления. Различают три технологические схемы строительства, отличающиеся последовательностью выполнения процессов укладки и заглубления:

I) с предварительной (до укладки трубопровода) разработкой подводной траншеи земснарядами;

2) с укладкой трубопровода и одновременным его заглублением в дно;

3) с предварительной укладкой трубопровода на дно и последующим его заглублением трубозаглубительным снарядом.

При первой и третьей технологических схемах укладку трубопровода можно выполнять любым возможным в данных конкретных условиях способом; при второй технологической схеме укладку можно выполнять либо с трубоукладочной баржи специальной конструкции, либо способом протаскивания трубопровода, на оголовке которого закреплено плужное устройство. Технология заглубления морских трубопроводов приведена в приложении I.

3.4. I способ - протаскивание по дну в зависимости от длины трубопровода и размеров береговой монтажной площадки можно применять для укладки трубопровода заданной (проектной) длины или при ограниченных размерах береговой площадки путем протаскивания отдельных плетей со сваркой стыков на берегу около уреза воды.

При значительной ширине пересекаемого пролива или залива (2 км и больше) протаскивание трубопровода целесообразно осуществлять при помощи тяговой лебедки, установленной на барже (см. ниже п.4.3), а при меньшей ширине пролива - при помощи лебедки, закрепленной на противоположном берегу залива (пролива).

При укладке трубопровода на защищенной акватории трубопровод можно протаскивать по дну предварительно отрытой подводной траншеи.

Примечание. Способ укладки трубопровода протаскиванием по дну тяговой лебедкой, установленной на барже, был применен на максимальную глубину 213 м (при диаметре 203 мм и длине 5,2 км), для укладки трубопровода максимальной длиной 30 км (при диаметре 762 мм и на глубину моря 48 м) и для укладки трубопровода с максимальным диаметром 1320 мм (при длине 18 км).

3.5. Способ укладки трубопровода протаскиванием по дну практически не лимитируется глубиной водной преграды. Применение этого способа ограничивается для труб малого диаметра (до 500 мм) их сопротивлением на разрыв и для труб большого диаметра мощностью тяговых средств, а также устойчивостью

трубопровода при протаскивании от бокового смещения под воздействием морских течений, нормальных к продольной оси трубопровода.

Этот способ укладки рекомендуется применять при пересечении морскими трубопроводами проливов и заливов шириной до 10 км, а также для сравнительно коротких трубопроводов, прокладываемых от берега к буровым платформам и в системе рейдового нефтяного причала.

3.6. II способ - укладка трубопровода свободным погружением с предварительной буксировкой плетей.

При укладке трубопровода этим способом на небольшие глубины (30-40м) можно применять обычные понтоны, имеющие постоянную плавучесть.

При значительных глубинах моря (40 м и больше) для уменьшения изгибающих напряжений можно применять понтоны переменной плавучести с приложением растягивающего усилия (натяжения) к укладываемой плети трубопровода.

3.7. Способ укладки трубопроводов свободным погружением с буксировкой плетей без понтонов или с обычными понтонами с постоянной плавучестью (грузоподъемностью) применялся:

при глубинах до 48 м (трубопровод диаметром 762 мм, длиной 41 км);

для укладки трубопровода длиной 20 км (диаметром 273 мм, при глубине 20 м);

трубопровода диаметром 1200 мм (длина 0,5 км, глубина 15 м).

Применение способа укладки трубопровода свободным погружением с буксировкой плетей, оснащенных обычными понтонами, ограничено напряжениями (которые возникают в трубопроводе в процессе его опускания на дно и зависят от глубины моря, диаметра и толщины стенки трубопровода), а также волновыми и ветровыми нагрузками на трубопровод при буксировке его к месту укладки.

Этот способ укладки может быть рекомендован при строительстве морских трубопроводов на закрытых акваториях с небольшими глубинами (до 30 м) с учетом необходимости защиты трубопроводов от ветровых и волновых воздействий в процессе буксировки.

3.8. Способ укладки трубопровода свободным погружением с понтонами переменной плавучести и приложением натяжения к укладываемому трубопроводу (метод S -образной кривой) приведен в приложении 2.

Примечание. Этот способ разработан и применен французскими специалистами при экспериментальной укладке плети трубопровода на максимальную глубину 2600 м (при диаметре 244 мм и длине 5 км).

Данный способ может быть рекомендован при пересечении трубопроводами небольших диаметров (до 400 мм) морских акваторий значительной протяженности с большими глубинами при наличии специальных понтонов переменной плавучести, изготовлении труб из специальных высокопрочных сплавов и оборудования для соединения плетей трубопровода в надводном положении.

3.9. II способ - укладка трубопровода с трубоукладочной баржи последовательным наращиванием.

При укладке трубопровода данным способом на глубины 30-40 м можно применять трубоукладочные баржи, оборудованные специальным спусковым устройством (стингером), которое служит для поддержания укладываемого трубопровода на участке от кормы баржи до дна.

При укладке трубопровода на большие глубины следует применять трубоукладочные баржи, оборудованные натяжным устройством и стингером. Растягивающее усилие, которое прикладывают к трубопроводу, уменьшает расчетные напряжения в нем на провисающем участке и увеличивает глубину укладки.

3.10. Укладка трубопровода при помощи трубоукладочной баржи методом последовательного наращивания рекомендуется в следующих случаях:

подводный трубопровод имеет большую протяженность;

требуется высокая производительность укладки трубопровода.

Учитывая большие эксплуатационные расходы на содержание трубоукладочного судна, этот способ может быть рекомендован при большом объеме работ при прокладке трубопровода в заданном районе морского побережья.

Способ укладки трубопровода с трубоукладочной барки получил широкое распространение в зарубежной практике строительства.

Примечание. Этот способ был применен при укладке трубопровода на максимальную глубину моря 116 м (при диаметре 762 мм и длине 95 км), для укладки трубопроводов с максимальной длиной 147 км (при диаметре 710 мм и на глубинах до 41 м) и для трубопровода с максимальным диаметром 1220 мм (при длине 23 км и на глубину 25 м).

3.11. IУ способ - укладка трубопровода сматыванием его с барабана, установленного на барже.

Данный способ может быть рекомендован для укладки на морских нефтегазовых месторождениях труб небольшого диаметра (до 305 мм) на значительные глубины (50 м и больше) при большом объеме работ, когда рентабельна эксплуатация специального трубоукладочного судна, оснащенного барабаном для намотки трубопровода и специальными натяжными устройствами для устранения остаточных деформаций в трубопроводе после его укладки на морское дно.

Примечание. Этот способ применяется в зарубежной практике строительства для укладки стальных труб диаметром до 305 мм и на глубины до 107 м.

Расчет трубопровода, укладываемого IУ способом (с учетом небольшого диаметра труб и укладки на большие глубины), можно производить по методу цепной линии (см.приложение 3).

4. УКЛАДКА ТРУБОПРОВОДА СПОСОБОМ ПРОТАСКИВАНИЯ ПО ДНУ

4.I. Технологический процесс укладки трубопроводов способом протаскивания через морские проливы с монтажом трубопровода на одном берегу и при установке тяговых средств (лебедок) на противоположном берегу пролива в принципе не отличается от обычного способа укладки трубопроводов через реки и водохранилища ("Указания по производству работ при сооружении магистральных стальных трубопроводов", вып.9)[9] .

4.2. При укладке трубопроводов способом протаскивания по дну лебедкой, установленной на барже, непосредственно перед укладкой должны быть выполнены следующие работы:

установлена и закреплена на барже тяговая лебедка заданной мощности;

установлено анкерное (мертвяковое) устройство в море на заданном расстоянии от проектного положения головного конца трубопровода;

проложена анкерная линия из троса (тросов) от берега к анкерному устройству в море;

установлена береговая спусковая дорожка;

монтаж, сварка, испытания, изоляция и балластировка плетей трубопроводов на береговой площадке (стапеле);

установлена тормозная лебедка на берегу в створе подводной трассы трубопровода.

4.3. Технологический процесс укладки трубопровода (см. схему, рис.8) включает следующие операции:

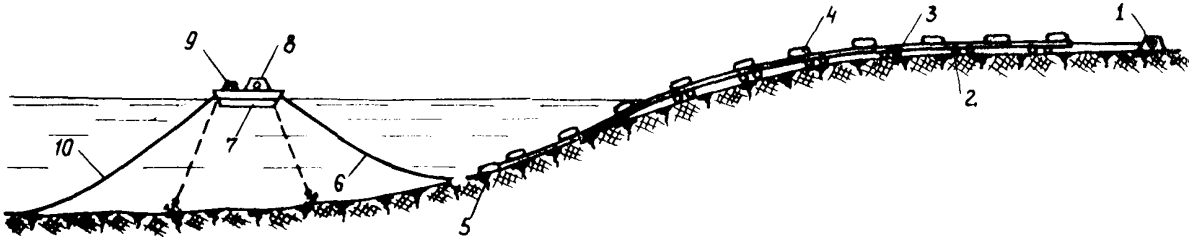

Рис.8. Схема укладки трубопровода способом протаскивания по дну:

I-тормозная лебедка; 2-тележки или роликоопоры; 3-трубопровод; 4-понтоны; 5-оголовок трубопровода; 6-тяговый трос; 7-баржа; 8-тяговая лебедка; 9-лебедка для сматывания анкерных тросов; I0-анкерная линия к анкеру

установку первой плети заданной длины на спусковую дорожку и закрепление тягового троса к оголовку трубопровода;

установку баржи с тяговой лебедкой на заданном расстоянии от берега по трассе трубопровода;

протаскивание первой плети трубопровода с наматыванием тягового троса на барабан лебедки;

перемещение баржи по трассе в направлении анкерного устройства с наматыванием анкерного троса на съемный барабан лебедки;

перемещение второй плети на спусковое устройство и приварка головного конца этой плети к хвостовому концу первой плети (эта операция осуществляется одновременно с перемещением баржи на вторую стоянку).

Указанный технологический процесс повторяют со всеми протаскиваемыми плетями трубопровода в указанной последовательности, пока не будет уложена последняя плеть.

4.4. Перед началом протаскивания трубопровода обязательно должен быть получен прогноз погоды. Укладка трубопровода может быть начата при прогнозируемом волнении моря до 3-х баллов.

4.5. Перед укладкой трубопровода необходимо обследовать подводную трассу, устранить препятствия, обнаруженные в створе, и проверить сохранность подводной траншеи на участках возможной ее заносимости.

4.6. В качестве тяговых средств для протаскивания плетей трубопровода можно применять следующие лебедки, развивающие тяговое усилие при работе с блоком:

Тип лебедки	Тяговое усилие, Т
ЛП I	I00
ЛП IA	I50
ЛП 30I	До 300
ЛП I5I	

4.7. Спусковая дорожка на берегу в зависимости от рельефа прибрежного участка, длины протаскиваемой плети трубопровода, его веса и диаметра может быть выполнена в виде:

береговой траншеи, заполняемой водой;

спусковой дорожки с роликоопорами, устанавливаемыми на подготовленное основание;

рельсового пути с тележками;

Требования, предъявляемые к конструкции спусковой дорожки для протаскивания морских трубопроводов, аналогичны требованиям к спусковым дорожкам для укладки подводных трубопроводов на переходах (см. Указания по производству работ при сооружении магистральных стальных трубопроводов [9]).

Для протаскивания плетей из труб диаметром 1020 мм можно рекомендовать спусковую роликовую дорожку типа ОСД-2 конструкции СКБ "Газстроймашина".

4.8. Тяговая лебедка должна быть установлена на специально оборудованной морской барже водоизмещением не менее 1000 т.

На рис.9 приведена схема возможного размещения тяговых устройств на барже.

4.9. Прокладку анкерной линии при помощи баржи выполняют следующим образом.

Анкерное устройство, рассчитанное на максимальное тяговое усилие, грузят на баржу и транспортируют в море на место установки. Петлю из троса, сходящего с двух барабанов (рис.9) на барже, запасовывают за уравнительный блок анкерного устройства. Эта петля намотана на два барабана таким образом, что половина троса находится на одном барабане, а вторая половина - на другом.

Анкерное устройство при помощи крана опускают на дно. Затем баржу буксиром отводят от анкера в сторону берега, одновременно анкерные тросы сматываются с барабанов и укладывают на дно за кормой баржи во время ее движения.

Баржу останавливают, когда анкерные тросы будут смотаны с барабанов. Далее концы анкерных тросов укрепляют в зажимах на корме баржи и пустые барабаны заменяют барабанами с тросами при помощи обслуживающего баржу плавкрана.

Петлю троса, сходящего с двух полных барабанов, и концы тросов, смотанных с предыдущих барабанов, соединяют между собой специальным соединительным устройством (рис.10).

Соединительное устройство включает:

уравнительный блок, на который заводят петлю троса от полных барабанов;

два клиновых захвата, в которых укрепляют концы троса, уложенного на дно с предыдущих барабанов;

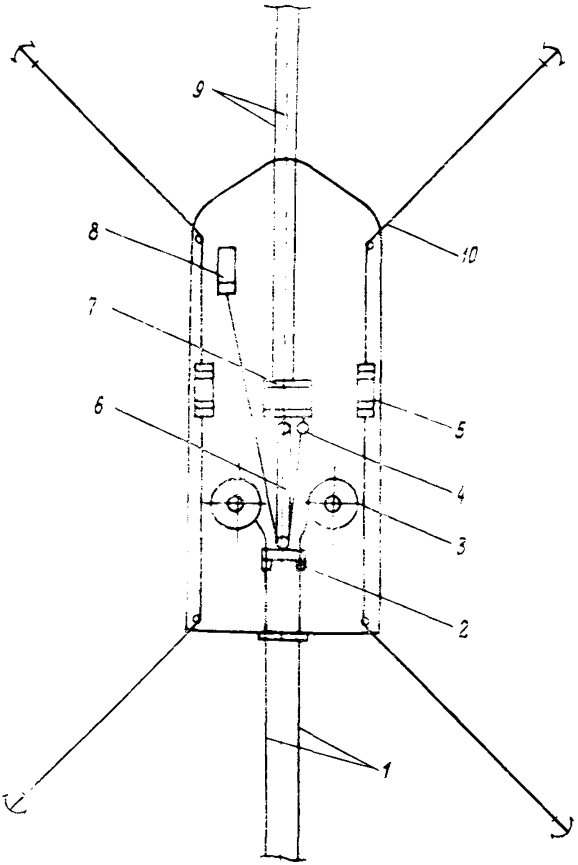

Рис.9. Схема расположения тяговых устройств на барже для протаскивания трубопровода:

I-анкерная линия (к анкерному устройству); 2-зажимное устройство для анкерных тросов; 3-съемные барабаны для укладки и сматывания анкерных тросов; 4-динамометр; 5-лебедки для якорей баржи; 6-полиспаст с блоками для подключения динамометра и некоторого перемещения зажимного устройства; 7-тяговая лебедка; 8-лебедка для обтяжки полиспастов и перемещения зажимного устройства; 9-тяговые тросы; I0-якорные тросы

понтон, который удерживает соединительное устройство в горизонтальном положении, предупреждая его заглубление в дно.

После освобождения зажимов на корме баржу буксируют до опорожнения барабанов, при этом соединительное устройство и анкерные тросы укладываются на дно.

Баржу раскрепляют на якорях или удерживают буксирами. Барабан лебедки освобождают от последних витков троса, снимают плавучим краном и заменяют новым с навитым тросом.

Свободные концы троса, снятые с предыдущего барабана, и петлю троса со вновь установленного барабара соединяют при помощи специального устройства так же, как указывалось выше.

Соединительное устройство краном опускают за корму, баржу снимают с якорей и буксируют к берегу до тех пор, пока на каждой стороне барабана лебедки остается по 2-3 витка. Затем повторяют операции, описанные выше.

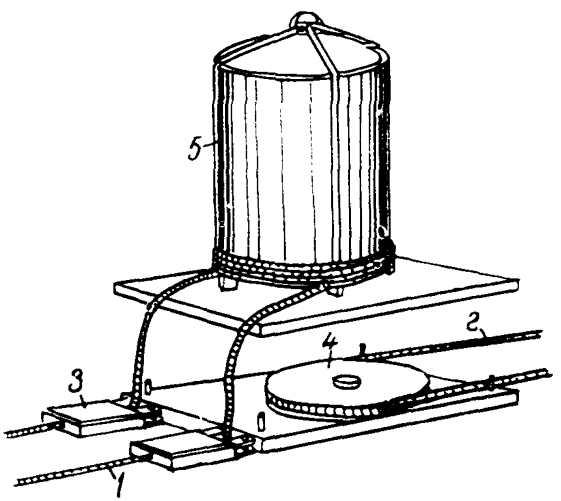

Рис.10. Устройство для соединения тросов анкерной линии:

1-трос в сторону анкерного устройства; 2-трос в сторону тяговой баржи; 3-клиновой зажим; 4-уравнительный блок; 5-понтон

Таким образом, последовательным перемещением баржи к берегу с установкой соединительных устройств и заменой бараба - нов осуществляют ступенчатую укладку двойной анкерной линии участками по 400–600 м.

4.10. Укладку трубопровода при прокладке анкерной линии способом, приведенным в п.4.9, выполняют следующим образом.

После подхода баржи на заданное расстояние от берега, т.е. к месту первой стоянки баржи, трос от тяговой лебедки, установленной на барже, пропускают через блок оголовка первой плети трубопровода.

Плеть трубопровода протаскивают лебедкой на расчетную длину, затем баржа отходит от берега, наматывая тросы анкерной линии на съемные барабаны, которые имеют привод, одновременно трос тяговой лебедки травят.

Заполненные барабаны с анкерными тросами снимают и заменяют пустыми. Соединительные устройства выбирают из воды на баржу и разбирают, концы тросов следующего участка анкерной линии заделывают на пустые барабаны, а тросы закрепляют в зажимных устройствах, связанных с тяговой лебедкой полиспастом. Затем осуществляют протаскивание следующего участка трубопровода.

4.11. Укладка двойной анкерной линии может быть выполнена также с использованием специальной баржи, оборудованной лебедкой со сдвоенным сменным барабаном конструкции СКБ "Газстроймашина". Лебедка представляет собой установку на общей раме трактора С-100М без ходовой части и сдвоенного барабана, вращающегося в роликах рамы. Раму лебедки крепят к набору палубы. Конструкция лебедки позволяет заменять барабаны.

4.12. Анкерная (мертвяковая) опора может быть выполнена в виде двухсекционного понтона, имеющего основание со стальными лапами для погружения в грунт и сопротивления тяговому усилию. Устройство может плавать на поверхности, погружаться на дно, и всплывать при подаче в секции понтона сжатого воздуха. К месту установки устройство можно буксировать или доставлять в собранном виде на палубе баржи.

4.13. Для предупреждения зарывания головного конца трубопровода в дно при протаскивании следует запроектировать конст-

рукцию оголовка в виде салазок с закрепленными понтонами. Парные понтоны в головной части трубопровода предотвращают поворот трубопровода вокруг своей оси (скручивание) при протаскивании.

4.14. В процессе протаскивания должна быть обеспечена двусторонняя дублированная связь пункта управления со всеми рабочими постами(с баржей, снабженной тяговой лебедкой, сварочным постом около уреза берега, с тормозной лебедкой, буксиром). Пункт управления может быть установлен на береговой вышке или в другом месте в зависимости от местных условий.

4.15. При определении длины тягового троса на участке от головного конца трубопровода до барки следует учитывать, что при недостаточной длине троса и значительных глубинах на трассе на головной конец трубопровода воздействует вертикальная составляющая тягового усилия, которая приподнимает головную часть трубопровода. При значительной длине троса, последний зарывается в дно и увеличивает необходимое тяговое усилие.

Для предупреждения подъема головного конца трубопровода при его протаскивании следует обеспечить горизонтальное положение тягового троса в месте его присоединения к головному концу трубопровода. С этой целью трос не следует выбирать в процессе протаскивания на определенном участке (в зависимости от глубины) между лебедкой и головным концом трубопровода. Длина этого участка определит (с учетом канатоемкости лебедки) место стоянки тяговой барки.

(Например, если принять, что трос не следует выбирать на участке 500 м, когда окончен один этап протаскивания перед переходом барки на новую стоянку, и канатоемкость лебедки составляет 1000 м, тогда расстояние между баржей и головным концом трубопровода в начале этапа протаскивания будет 1500 м, а при окончании, когда барка меняет место стоянки,–500 м.)

Это условие определяет также длину плетей, монтируемых на берегу, которые для данного примера могут быть приняты 1000 м (если такая длина плети допустима по условиям рельефа береговой площадки).

Длина участка, на которок не следует выбирать тяговый трос (в приведенном примере 500 м) на мелководных участках, сложенных песчаными отложениями,может быть уменьшена для предупреждения зарывания троса в песчаное дно на значительном протяжении.

4.16. Процесс протаскивания трубопровода должен осуществляться круглосуточно с перерывами, связанными только с перемещениями баржи и сваркой стыков между плетями на берегу. В случаях, когда процесс протаскивания прерывается (например, на время значительных поперечных приливно-отливных течений или по другим причинам), рекомендуется осуществлять периодическое продвижение (протаскивание) трубопровода на короткие участки 5-6 м для предупреждения присоса трубопровода.

4.17. Перед началом укладки трубопровода большой длины (3 км и больше) целесообразно выполнить опытное протаскивание плети трубопровода с одновременной проверкой всего оборудования, такелажа и держащей силы якорей. Затраты на укладку опытной плети и ее обратное протаскивание к берегу должны быть учтены в сметно-финансовом расчете на строительство трубопровода.

4.18. При протаскивании трубопровода по дну предварительно отрытой траншеи следует предусмотреть мероприятия по предупреждению заполнения траншеи наносами. В зависимости от местных условий одним из возможных мероприятий является устройство шпунтового ограждения на участке действия прибоя.

Кроме того, в затратах на строительство следует учесть необходимость удаления наносов из траншеи на прибрежном участке непосредственно перед протаскиванием трубопровода.

4.19. Максимальная длина трубопровода, который может быть уложен способом протаскивания, зависит от:

мощности тяговой лебедки;

коэффициента трения трубопровода о грунт;

минимального допустимого веса (отрицательной плавучести трубопровода), который в свою очередь зависит от величин поперечных скоростей течения, воздействующих на трубопровод в процессе протаскивания.

На рис.11 приведена графическая зависимость величины тягового усилия от веса и длины подводного трубопровода (при тяговом усилии 150 Т, коэффициенте трения 0,60 и отрицательной плавучести 30 кГ/м, максимальная длина протаскиваемого трубопровода составляет 8,5 км).

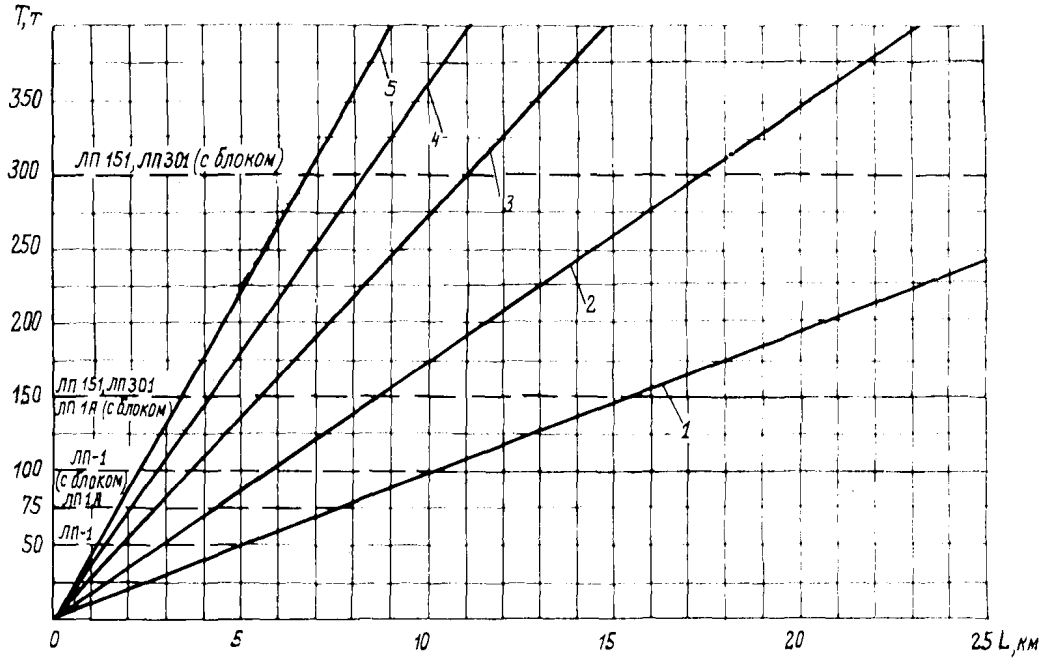

Рис.II. Зависимость величины тягового усилия (Т) от длины подводного трубопровода (L) для различных величин отрицательной плавучести ($П_0$):

I - $П_0$= 15 кГ/м; 2 - $П_0$ = 30 кГ/м; 3 - $П_0$ = 45 кГ/м; 4 - $П_0$ = 60 кГ/м; 5 - $П_0$ = 75 кГ/м

4.20. Для укладки трубопровода способом протаскивания по дну необходимы следующее оборудование и плавучие технические средства:

трубоукладчики Т3560;
трактор;
бульдозер;
трубоукладчик ТІ530;
электросварочный агрегат;
баржа водоизмещением 800-1000 т;
баржа водоизмещением 200-300 т;
лебедка тяговая;
лебедка тормозная;
якорная лебедка на базе трактора С-100М;
плавучий кран грузоподъемностью 30-50 Т;
самоходная завозня для якорей;
катер-буксир 600 л.с.;
катер 150 л.с.;
катер;
легковой катер;
водолазный самоходный бот;
шлюпка;
понтоны грузоподъемностью 1,5-5 Т;
якоря;
рельсовый путь с комплектом тележек или комплект роликоопор;
тросы анкерной линии;
тросы тяговые;
мертвяковая опора;
радиостанция.

Количество и мощность оборудования и плавтехсредств определяются в проектах организации строительства и производства работ в зависимости от длины и диаметра укладываемого трубопровода и местных условий.

4.21. При разработке технологии укладки трубопровода способом протаскивания по дну необходимо выполнить следующие расчеты:

веса трубопровода без балласта и с балластом при нахождении его на суше (на спусковой дорожке);

отрицательной плавучести трубопровода с балластом и закрепленными разгружающими понтонами;

количества и мест закрепления разгружающих понтонов;

волновых воздействий и течений на трубопровод;

тяговых усилий на трубопровод в различные периоды протаскивания трубопровода;

напряжений в трубопроводе в процессе протаскивания;

допустимого радиуса кривой, по которой проектируется профиль спусковой дорожки и расстояний между роликоопорами или тележками спускового пути.

5. УКЛАДКА ТРУБОПРОВОДА СПОСОБОМ СВОБОДНОГО ПОГРУЖЕНИЯ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ БУКСИРОВКОЙ ПЛЕТЕЙ

5.1. При укладке трубопровода способом свободного погружения с предварительной буксировкой плетей непосредственно перед укладкой должны быть выполнены следующие работы:

монтаж, сборка, испытание, изоляция, балластировка и оснащение понтонами отдельных плетей на береговой строительной площадке;

устройство и оборудование спусковой дорожки.

5.2. Технологический процесс укладки трубопровода способом свободного погружения с буксировкой отдельных плетей и сваркой их на плаву состоит из следующих операций:

установки судна, оборудованного для монтажа, сварки и изоляции стыков между плетями трубопровода на трассе;

вывода плетей трубопровода буксирами в море и транспортировки их к месту укладки;

стыковки ранее уложенной плети с вновь прибуксированной на специально оборудованном судне;

укладки плети по створу трассы путем залива воды в трубопровод.

На рис.12 приведена схема укладки подводного трубопровода способом свободного погружения с предварительной буксировкой плетей.

5.3. Укладку трубопровода способом свободного погружения рекомендуется осуществлять в следующих случаях:

длина подводного морского трубопровода или направление трассы прокладки не позволяют применять способ протаскивания по дну;

в районе трассы трубопровода нет судоходства или его можно остановить на время транспортировки плетей, установки трубопровода в створе трассы и погружения его на дно;

поверхностные скорости течения не препятствуют буксировке плетей и не требуются сложных устройств для удержания плавающей плети трубопровода в створе трассы.

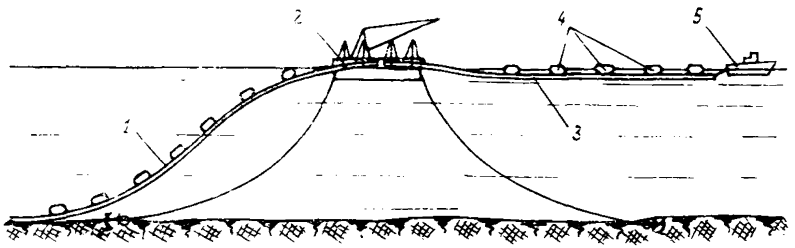

Рис. 12. Схема укладки подводного трубопровода способом свободного погружения с буксировкой плетей:

I-уложенная плеть трубопровода; 2-судно для стыковки плетей; 3-наращиваемая плеть трубопровода; 4-понтоны; 5 - буксир

5.4. Укладка способом свободного погружения с буксировкой плети может найти наиболее широкое применение при прокладке трубопроводов большой протяженности, на защищенных от течений и волн морских акваториях. Этот способ можно применять при волнении до 3-4 баллов.

5.5. Максимальную глубину моря в месте укладки трубопровода способом свободного погружения определяют расчетом в зависимости от диаметра и толщины стенки трубы, марки стали, соотношения отрицательной (σ) и положительной (q) плавучести трубопровода в процессе укладки.

5.6. При разработке технологии укладки трубопроводов способом свободного погружения с буксировкой плетей необходимо выполнить следующие расчеты и при этом определить:

вес трубопровода в различном положении в воде и на суше;

расчетные (допускаемые) значения положительной и отрицательной плавучести трубопровода в зависимости от напряжения изгиба, возникающего при опускании трубопровода на заданную глубину;

максимальные напряжения, возникающие в трубопроводе от воздействия всех нагрузок на трубопровод в процессе погружения на дно;

расстояние между понтонами и их количество, необходимое для оснащения плети трубопровода;

длину изогнутого участка упругой линии трубопровода в процессе погружения;

количество и мощность буксирных средств, необходимых для буксировки трубопровода и установки его в створ трассы.

5.7. Монтажную площадку со спусковой дорожкой при укладке способом свободного погружения можно располагать вне створа трассы.

Длину плетей трубопровода, подготавливаемых на монтажной площадке к буксировке и укладке, рекомендуется принимать 1-1,5 км.

Плети трубопровода перед изоляцией и балластировкой должны быть подвергнуты гидравлическому испытанию, после окончания которого необходимо полностью удалить воду из трубопровода. Оставшаяся в плети трубопровода вода значительно изменяет его расчетную плавучесть и может привести к затоплению трубопровода при спуске его на воду.

5.8. При благоприятном рельефе прибрежного участка спусковую дорожку целесообразно устраивать в виде траншеи, заполненной водой и соединенной с морем. В такой траншее можно проверить правильность расчета плавучести трубопровода перед его буксировкой. Если невозможно устроить траншею, расположенную перпендикулярно к урезу воды, плети трубопровода можно монтировать на лежках или стеллажах вдоль уреза воды.

Перекладку плетей трубопровода в траншею или в море осуществляют трубоукладчиками. На строительно-монтажной площадке необходимо иметь дополнительный трубоукладчик на случай аварии и выхода из строя основной машины.

5.9. Перед опусканием плети на строительно-монтажной площадке оба конца трубопровода оснащают двумя патрубками для нагнетания и травления воздуха и залива воды.

На прибрежных мелководных участках плеть буксируют катером типа БМК мощностью 100-130 л.с. с осадкой до 0,6 м, после

того как оголовок плети достигнет больших глубин, буксирный трос передают более мощному буксиру 250–300 л.с., который продолжает вытягивать плеть в море, предохраняя ее от сноса на берег.

5.10. Плеть трубопровода буксируют к месту укладки головным морским буксиром мощностью 1000–1500 л.с. и хвостовым буксиром мощностью 300 л.с. Скорость буксировки может составлять 6–9 км/ч.

Необходимое тяговое усилие для буксировки плети можно определить [10] по формуле

$$R = f \cdot S \cdot v^{1,83} + C_x \gamma_в \frac{0,785 d_п^2 \cdot v^2}{2g} \cdot n \cdot m , \qquad (I)$$

где f – коэффициент трения воды о смоченную поверхность $f = 0,2$;

S – смоченная поверхность плети с поплавками, $S = \pi d_н L + \pi d_п \ell n$;

$d_н$ – наружный диаметр газопровода с учетом изоляции, м;

L – длина буксируемой плети, м;

$d_п$ – наружный диаметр понтона, м;

ℓ – длина понтона, м;

C_x – коэффициент лобового сопротивления, $C_x = 0,8$;

$\gamma_в$ – объемный вес морской воды, кг/м^3;

v – скорость буксировки, м/сек;

n – число понтонов на плети;

m – переходной коэффициент от цилиндрической поверхности к плоской, $m = 1,4$;

g – ускорение силы тяжести, м/сек^2.

В практике определения мощности буксирных судов с достаточной точностью принимают тягу на гаке при скорости буксировки 5 узлов (9,2 км/ч) из расчета 10 кг на 1 л.с. мощности двигателя.

5.11. При прокладке нефтепроводов способом свободного погружения с буксировкой плетей заглушенные по концам плети трубопровода транспортируют в створ трассы и опускают на дно путем залива воды в трубопровод с одного конца и выпуска воздуха с другого. При прокладке газопровода, балластированные и заглушенные плети трубопровода перед спуском на воду оснащают понтонами. Опускание на дно осуществляют путем залива воды в трубопровод.

5.12. Перед навеской понтонов на плеть трубопровода их соединяют между собой тросами, длину которых определяют по расчетному расстоянию между понтонами. Один конец троса присоединяют к раме понтона, другой-к рычагу запорного устройства следующего понтона.

Понтоны устанавливают таким образом, чтобы запорное устройство было направлено к головному концу плети. Тросы, соединяющие понтоны, и тросы, закрепляющие понтоны к трубопроводу, должны быть сильно натянуты, чтобы исключить смещение понтонов, которое может вызвать самопроизвольную их отстропку при транспортировке плети.

5.13. В качестве разгружающих понтонов можно рекомендовать понтон с устройством для механической отстропки конструкции института "Гипроморнефть". Понтон из сдвоенных емкостей и его крепление к трубопроводу показаны на рис.13.

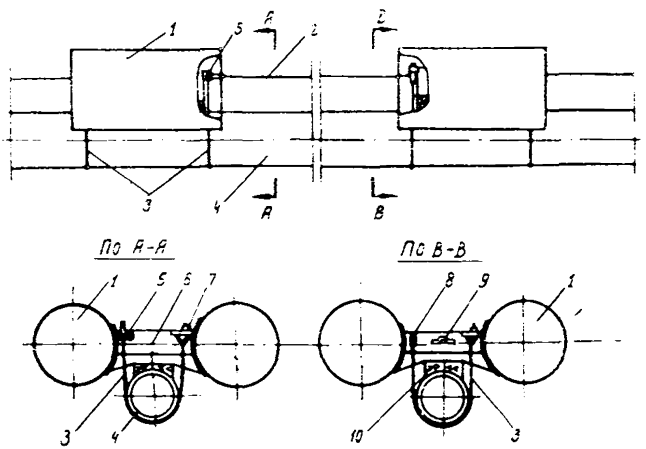

Рис.13. Понтон из сдвоенных емкостей и его крепление к трубопроводу:

1-поплавок; 2-трос для отстропки понтонов; 3-строповочные тросы для крепления понтонов; 4-трубопровод; 5-устройство для механической отстропки понтона; 6-поперечная балка рамы; 7-натяжной болт; 8-крюк; 9-скоба для крепления троса отстропки; 10-деревянная бобышка

Понтон грузоподъемностью 1000 кГ представляет собой два поплавка, соединенных между собой стальной рамой. Понтон прикрепляют к трубопроводу двумя строповочными тросами. Понтоны открепляют путем поворота рычага устройства для механической отстропки (рис.14) вверх. При повороте рычага вверх огон строповочного троса, огибая фасонный конец валика, соскользнет, понтон всплывет передним концом вверх, петля заднего строповочного троса соскочит с крюка и понтон полностью освободится.

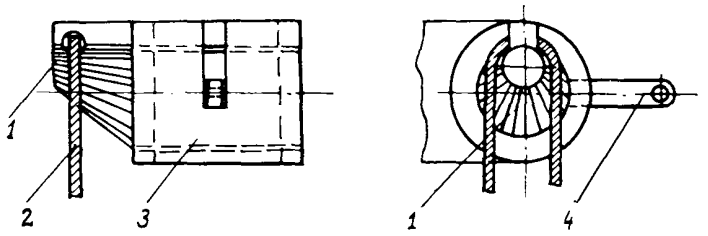

Рис.14. Устройство для механической отстропки понтона:
1-валик; 2-огон строповочного троса; 3-корпус; 4-рычаг поворота валика

5.14. Для отсоединения от трубопровода группы понтонов при помощи троса для отстропки открывают запорное устройство первого понтона, который, всплывая, воздействует на рычаг механизма отстропки следующего понтона. Таким образом происходит последовательная отстропка всех понтонов.

При расстоянии между понтонами большем, чем глубина по трассе, их отсоединяют посредством натяжения троса с катера или малого буксира, перемещающегося над уложенной плетью трубопровода.

5.15. После укладки трубопровода на дно отсоединяют все понтоны за исключением понтонов, оставляемых на головном конце плети и необходимых для последующего подъема конца трубопровода на поверхность воды.

Количество оставляемых понтонов определяется длиной упругой линии трубопровода от поверхности воды до дна.

Понтоны, применяемые для подъема конца плети, не соединяют тросом для отстропки с остальными понтонами.

5.16. Стыковку плетей трубопровода в море можно выполнять на крановом судне водоизмещением 1600-2000 т.

Грузоподъемность кранового оборудования судна устанавливается в зависимости от диаметра и веса трубопровода. При укладке трубопроводов диаметром 300-400 мм судно должно быть оборудовано двумя кранами (грузоподъемностью 40 Т на минимальном вылете по борту 20 Т - на максимальном), кранбалками (грузоподъемностью по 4-6 Т) и подвесной люлькой для стыковки плетей, расположенной в средней части судна на минимальной высоте от поверхности воды. На крановом судне необходимы компрессор и сварочный агрегат.

Трассу подводного трубопровода, место стоянки кранового судна и конец ранее уложенной плети обозначают буями. Маневры судна около конца плети осуществляют кормовым и носовым якорями с наветренного борта.

5.17. Подъем конца ранее уложенной плети на поверхность воды осуществляют путем закачки воздуха в трубопровод. Воздух в трубопровод закачивают компрессором через шланг, который подключает водолаз к воздушному вентилю трубопровода.

5.18. Конец плети, после того как она всплыла на поверхность воды, поднимают краном и кран-балками и укладывают для стыковки в люльку, в которой конец трубопровода закрепляют в зажимных устройствах. Далее стравливают через воздушный клапан воздух, отрезают часть трубы с патрубками и подготавливают кромки трубы для сварки.

Воздух можно стравливать после того как перекрыт доступ воды в трубопровод с противоположного конца.

К моменту окончания этих операций новая плеть трубопровода должна быть прибуксирована к судну для стыковки. Оголовок новой плети поднимают и укладывают в люльку, отрезают ненужную часть трубы, закрепляют в зажимных устройствах и подготавливают торец трубы к сварке (рис.15).

5.19. Для центровки труб зажимные устройства должны иметь возможность перемещаться в горизонтальной плоскости. Окончательную центровку выполняют при помощи наружного центратора.

Качество сварки стыка проверяют радиографическим методом, и стык изолируют.



Рис.15. Подготовка торца трубы к сварке

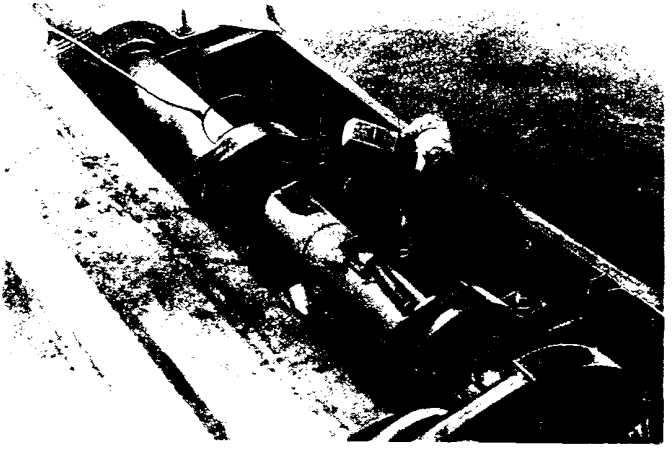

Рис.16. Сварка стыка плетей трубопровода в люльке

На рис.16 показана сварка стыка плетей трубопровода в люльке.

Подъем сваренных плетей трубопровода из люльки и опускание их в воду осуществляют при помощи крана и четырех кранбалок при строповке трубопровода в пяти опорных точках. Опускать трубопровод следует при синхронной работе всех механизмов.

При опускании трубопровода мощный буксир должен держать конец плавающей плети в постоянном натяжении, чтобы предотвратить снос и искривление трубопровода ветром и течением и обеспечить тем самым точную укладку плети по проектному створу.

5.20. На основании опыта укладки газонефтепроводов на Каспийском море способом свободного погружения установлено, что при благоприятных гидрометеорологических условиях на спуск в море плети трубопровода длиной 1 км, ее транспортировку на расстояние примерно 10 км, подъем ранее уложенной плети, стыковку плетей, опускание трубопровода и отстропку понтонов требуется в среднем 10-12 часов при средней скорости буксировки плети 5 км/ч.

5.21. Если получено сообщение о возможном шторме, то необходимо немедленно погрузить плеть трубопровода на дно, а суда направить в укрытие. Плеть в этом случае погружают путем залива воды через специальный клапан на оголовке с одновременным натяжением плети.

5.22. Для укладки морского трубопровода способом свободного погружения необходимы следующее оборудование и плавучие технические средства:

сварочный агрегат АСДП-500;
сварочный агрегат АСБ-300;
трубоукладчики;
изоляционная машина;
очистная машина;
опрессовочный агрегат;
бульдозер;
водолазный рейдовый катер РВН-376;
буксир рейдовый 300 л.с.;
катер;
крановое судно для стыковки плетей;

морской буксир мощностью примерно 1000 л.с.;
комплект понтонов для оснащения двух плетей трубопровода;
радиостанция;
шлюпка;
компрессор.

Количество и мощность оборудования и главтехсредств определяются в проектах организации строительства и производства работ в зависимости от длины и диаметра укладываемого трубопровода и местных условий.

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДА ПРИ УКЛАДКЕ СПОСОБОМ СВОБОДНОГО ПОГРУЖЕНИЯ

5.23. На рис.17 приведена расчетная схема укладки трубопровода способом свободного погружения.

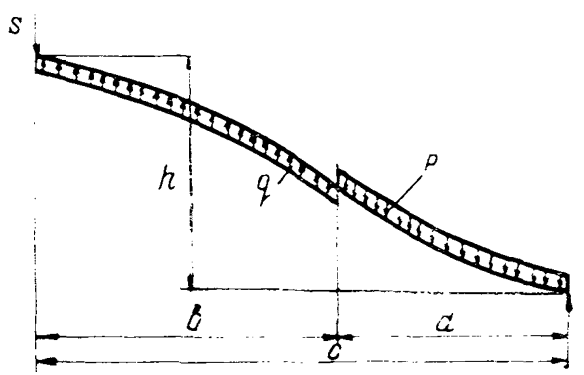

Рис.17. Расчетная схема при укладке трубопровода способом свободного погружения

При выводе расчетных формул в данной схеме условно принято, что угол поворота и изгибающий момент в точке выхода трубопровода на поверхность воды и в точке касания дна равны нулю. Выводы основаны на интегрировании приближенного дифференциального уравнения изогнутой оси.

Эта методика расчета применяется для определения необходимых параметров при укладке морских трубопроводов способом свободного погружения на глубины до 30 м.

5.24. Максимальные напряжения на участках a и b определяют по формулам:

$$\sigma_a = D_н \sqrt{\frac{3EJh\omega}{8J}} \cdot \psi_a , \qquad (2)$$

$$\sigma_b = D_н \sqrt{\frac{3EJh\omega}{8J}} \cdot \psi_b , \qquad (3)$$

где ψ_a и ψ_b - коэффициенты, зависящие от отношения $\frac{p}{q}$ и определяемые по графику на рис.18;

p - результирующая сила, действующая на единицу длины трубопровода, направленная вниз, кГ/см;

q - подъемная или выталкивающая сила воды, действующая на единицу длины трубопровода, кГ/см;

$D_н$ - наружный диаметр трубы, см;

J - момент инерции трубы, $см^4$;

E - модуль упругости стали, $кг/см^2$;

$\omega = p + q$, кГ/см;

h - разность отметок упругой линии трубопровода в опорных точках, которую можно принять равной глубине воды, см;

R - реакция грунта, действующая на трубопровод, кг;

S - вес участка трубопровода, дополнительно поднимающегося над поверхностью воды при погружении трубопровода, кг (см.рис.17);

a - длина участка трубопровода, на котором действует сила p, см;

b - длина участка трубопровода, на котором действует сила q, см.

При отношении $\frac{p}{q} > 1$, максимальные напряжения возникают на участке изгиба a, при $\frac{p}{q} < 1$ - на участке изгиба b.

5.25. Максимальную глубину, на которую можно уложить трубопровод способом свободного погружения, определяют по формуле

$$h_{макс} = \frac{8J\sigma^2_{доп}}{3D_н^2 J \omega \psi^2} , \qquad (4)$$

где $h_{макс}$ - максимальная глубина воды, см;

$\sigma_{доп}$ - допускаемое напряжение в трубопроводе, $кГ/см^2$;

ψ - определяется по графику (рис.18) в зависимости от отношения $\frac{p}{q}$.

Для заданного трубопровода максимальная глубина укладки зависит от отношения $\frac{p}{q}$ и величины $\omega = p + q$.

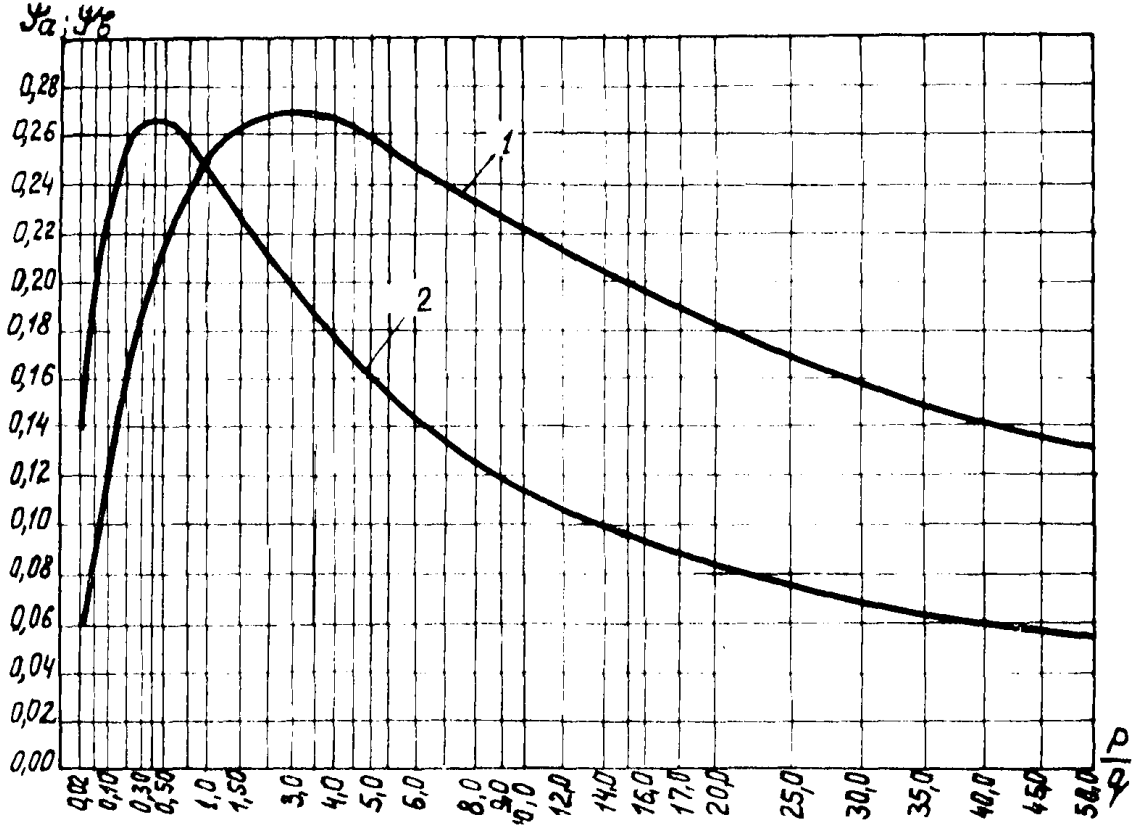

Рис.18. Значения коэффициентов ψ_a и $\psi_б$ в зависимости от отношения $\frac{P}{q}$:

$1 - \psi_a = f\left(\frac{P}{q}\right)$; $2 - \psi_б = \varphi\left(\frac{P}{q}\right)$

5.26. Длину участка a определяют по формуле

$$a = \varphi_a \sqrt[4]{\frac{6hEJ}{\omega}}, \qquad (5)$$

где

$$\varphi_a = \sqrt{\frac{2}{n-1}}. \qquad (6)$$

Значение $n = \frac{c}{a}$ в зависимости от отношения $\frac{p}{q}$ можно определить по графикам на рис.19 и 20 или из уравнения

$$\frac{p}{q} = \frac{2-3n+n^3}{3n-2}. \qquad (7)$$

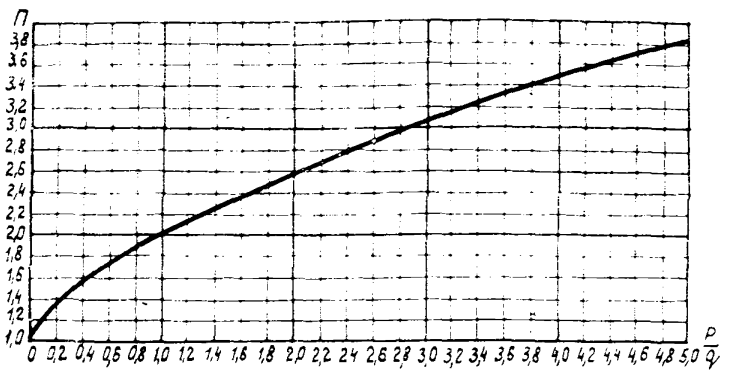

Рис.19. Значения n в зависимости от отношения $\frac{p}{q}$ ($\frac{p}{q}$ изменяется в пределах 0 - 5,0)

Длину изогнутого участка трубопровода C определяют по формуле

$$C = na, \qquad (8)$$

а длину участка b по формуле

$$b = c - a,$$

где C - длина изогнутого участка трубопровода, см.

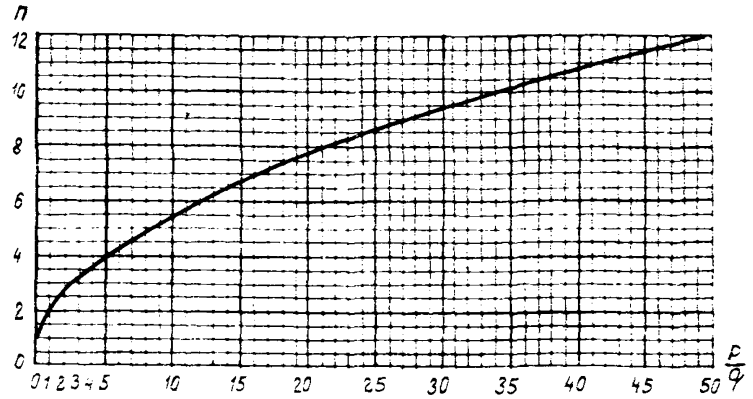

Рис.20. Значения n в зависимости от отношения $\frac{p}{q}$ ($\frac{p}{q}$ изменяется в пределах 0 – 50,0)

Реакцию грунта, действующую на трубопровод, R, определяют по формуле

$$R = a\omega - \frac{a^2\omega}{2c} - \frac{qc}{2} \qquad (9)$$

5.27. При использовании понтонов возникают дополнительные местные напряжения изгиба, которые следует суммировать с продольными напряжениями, возникающими при укладке. Эти напряжения определяют расчетом трубопровода, как многопролетной балки с опорами в местах закрепления понтонов

$$\sigma = \frac{k p_n l^2}{W_т}, \qquad (10)$$

где σ – местные напряжения изгиба, кГ/см^2;

k – коэффициент, равный для многопролетной балки 0,0781;

$W_т$ – момент сопротивления трубы, см^3;

p_n – равномерно распределенная нагрузка, кГ/см,

$$p_n = \frac{Q_n}{l},$$

где Q_n – грузоподъемность понтона, кГ;

l – расстояние между понтонами, см.

6. УКЛАДКА ТРУБОПРОВОДА С ТРУБОУКЛАДОЧНОЙ БАРЖИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ НАРАЩИВАНИЕМ

6.I. Укладка трубопровода с баржи последовательным наращиванием состоит из следующих операций:

заготовки на береговых базах изолированных и обетонированных труб (секций);

транспортировки труб (секций) на грузовых баржах к трубоукладочной барже и выгрузки труб краном трубоукладочной баржи;

монтажа и сварки отдельных труб в нитку на монтажной эстакаде баржи, контроля и изоляции стыков;

перемещения баржи по трассе при помощи якорной системы на длину одной секции трубопровода с одновременным спуском трубопровода на дно.

6.2. Эффективность укладки трубопроводов с барж зависит от четкой и координированной работы составных частей трубоукладочной системы:

трубоукладочной баржи;

плавучего стингера;

устройства для создания натяжения трубопровода;

якорной системы.

При укладке трубопровода необходим непрерывный контроль напряжений, которые возникают на верхнем выпуклом участке трубопровода, поддерживаемым стингером, и нижнем вогнутом провисающем участке трубопровода.

6.3. Трубоукладочная баржа представляет собой большое морское судно с необходимыми устройствами для выполнения сварочно-монтажных и укладочных работ.

В табл.2 приведены некоторые данные о трубоукладочных баржах, применяемых в зарубежной практике строительства морских трубопроводов [3],[II-I4] .

Трубоукладочная баржа должна быть оборудована:

площадками для складирования звеньев обетонированных труб;

кранами для перемещения звеньев труб с площадки складирования на монтажную эстакаду, а также с берегового причала или грузовой баржи на площадку складирования трубоукладочной баржи;

сварочно-монтажной эстакадой, на которой размещены следующие рабочие посты:

центровки труб;

сварки стыков;

проверки качества сварки физическими методами;

очистки, изоляции и обетонирования стыков труб.

Большинство применяемых трубоукладочных барж оборудовано пятью-восемью рабочими постами, из которых три-пять представляют собой сварочные станции;

спусковым устройством (стингером) для поддержания трубопровода и уменьшения напряжений в нем на участке от кормы до дна;

якорной системой для периодического перемещения баржи по трассе трубопровода;

натяжным устройством для уменьшения напряжений на провисающем участке трубопровода между кормой баржи и дном моря;

жилыми и бытовыми помещениями для судового экипажа и производственного состава.

6.4. На всех постах сварочно-монтажной линии операции выполняют одновременно. После окончания всех рабочих операций баржу перемещают при помощи якорной системы на длину одной секции и сваренная нить трубопровода спускается по стингеру на дно.

Производительность укладки трубопроводов с баржи зависит от количества циклов (в сутки), которые выполнены на всех постах технологической линии и окончены продвижением баржи на расстояние, равное длине одной трубы (секции).

Суточную техническую производительность укладки трубопровода с баржи можно определить по формуле

$$П_{сут} = \frac{24 \cdot l}{t + t_{пер}} \qquad (11)$$

где $П_{сут}$ – техническая производительность укладки, м/сут;

l – длина наращиваемой трубы или секции, м;

t – время, затрачиваемое на самую продолжительную операцию, на одном из постов, час;

$t_{пер}$ – время, затрачиваемое на продвижение баржи на расстояние, равное длине трубы (секции), час.

6.5. Трубоукладочная баржа может быть оборудована прямолинейным жестким или криволинейным шарнирным стингером.

На рис.21 приведена схема укладки трубопровода с баржи при помощи прямолинейного жесткого стингера. Этот способ применяют для укладки морских трубопроводов на глубинах до 30-40 м.

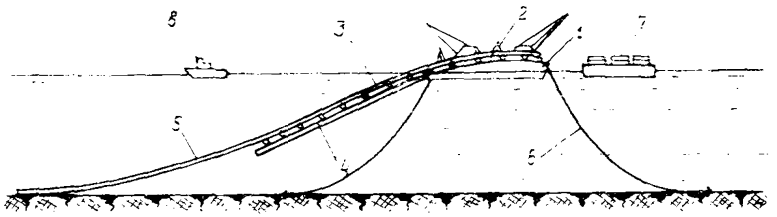

Рис.21. Схема укладки трубопровода с баржи при помощи жесткого прямолинейного стингера:

1-трубоукладочная баржа; 2-сварочно-монтажная линия; 3-укладываемый трубопровод; 4-стингер; 5-провисающий участок трубопровода; 6-якорный трос; 7-грузовая баржа с трубами; 8-буксир для переноски якорей

На рис.22 дана схема укладки трубопровода с баржи при помощи криволинейного шарнирного стингера с приложением растягивающего усилия. Этот способ укладки применяют на глубинах 100 м и больше.

6.6. Прямолинейный стингер, применяемый для поддержания верхнего участка трубопровода, обычно представляет собой длинную прямолинейную жесткую конструкцию, состоящую из двух трубчатых понтонов, соединенных поперечными балками, которые оборудованы роликами, служащими опорами для трубопровода во время его спуска на дно.

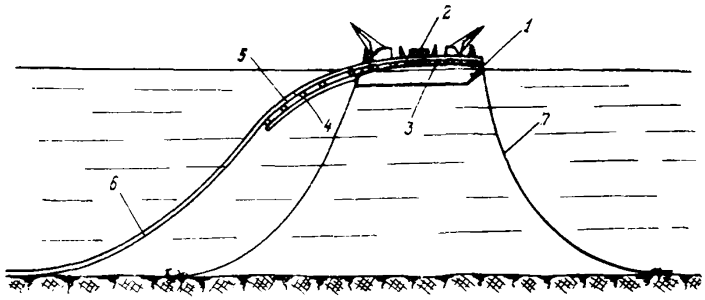

Рис.22. Схема укладки трубопровода с баржи при помощи криволинейного шарнирного стингера:

1-трубоукладочная баржа; 2-механизм натяжения; 3-трубопровод на сварочно-монтажной линии; 4-жесткий криволинейный или шарнирный стингер; 5-выпуклый участок трубопровода; 6-вогнутый участок трубопровода; 7-якорный трос

Во избежание чрезмерного изгиба трубопровода в верхней части прямолинейный стингер должен быть спущен под углом, близким к углу наклона монтажной эстакады баржи. Для того чтобы предотвратить чрезмерный изгиб в нижней провисающей части трубопровода, прямолинейный стингер должен опускать трубу почти до самого дна.

6.7. Прямолинейный жесткий стингер имеет следующие особенности:

1) применение стингера ограничено глубинами моря; при укладке трубопровода на различных глубинах требуются стингеры различной длины (длину прямолинейного стингера обычно выбирают равной 4-6 глубинам в месте укладки трубопровода).

Практически максимальная длина прямолинейного стингера около 180 м и максимальная глубина воды в месте укладки трубопровода составляет 45 м;

2) при использовании прямолинейного стингера в трубопроводе могут возникнуть значительные напряжения в месте его схода со стингера.

6.8. Криволинейный шарнирный стингер рекомендуется использовать при укладке трубопровода на большие глубины с приложе-

нием горизонтального растягивающего усилия для поддержания верхнего участка трубопровода.

Криволинейный стингер состоит из ряда сегментов, соединенных между собой специальными шарнирными соединениями, обеспечивающими ограниченную степень свободы перемещения сегментов в вертикальной плоскости.

Сегменты стингера имеют отсеки с регулируемой плавучестью для поддержания трубопровода различного веса. Гибкость стингера в вертикальной плоскости в сочетании с натяжением трубопровода позволяет укладывать трубопровод на больших глубинах и уменьшает необходимую длину стингера.

На рис.23 показан криволинейный шарнирный стингер в различных положениях.

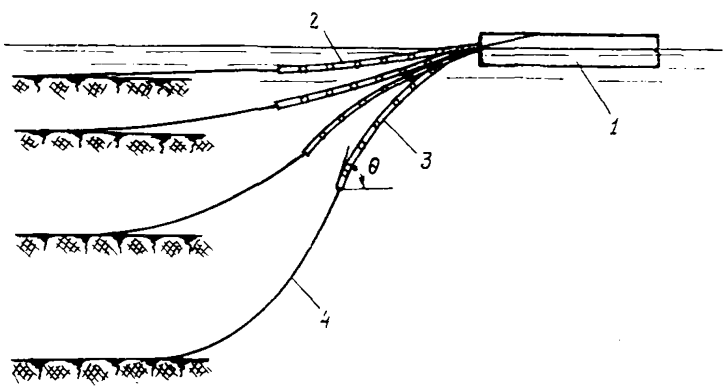

Рис.23. Положение криволинейного шарнирного стингера при работе на мелководье, средних и больших глубинах:
1-трубоукладочная баржа; 2-шарнирный стингер; 3-верхний участок изгиба трубопровода; 4-провисающий участок трубопровода

6.9. Криволинейный шарнирный стингер имеет следующие преимущества по сравнению с прямолинейным:

допустимая глубина укладки трубопроводов в несколько раз больше;

при меньшей длине и гибкости его буксировка значительно облегчается;

этот стингер дешевле, так как имеет меньшую длину, чем соответствующий прямолинейный жесткий стингер, и его стандартные элементы можно неоднократно использовать.

Опорные реакции между поддерживаемым трубопроводом и стингером распределяются равномерно вдоль длины стингера.

6.10. С увеличением глубины укладки возрастает угол наклона трубопровода в точке касания с нижним концом стингера (θ). Этот угол определяет длину шарнирного стингера (длину дуги).

Таким образом, длина шарнирного стингера определяется по максимальной ожидаемой глубине по трассе укладки трубопровода.

При укладке трубопровода на большую глубину шарнирный стингер должен быть максимально изогнут (см.рис.23). Радиус изгиба стингера не должен быть меньше допустимого радиуса изгиба трубопровода.

6.11. Прямолинейный жесткий и криволинейный шарнирный стингер должны сопрягаться с монтажной эстакадой на барже радиусом ρ , минимальное значение которого определяют по формуле

$$\rho_{доп} = \frac{E D_н}{2 R_z} , \qquad (12)$$

где $\rho_{доп}$ - допустимый радиус изгиба трубопровода, см;
$D_н$ - наружный диаметр трубопровода, см;
E - модуль упругости стали, кг/см^2;
R_z - расчетное сопротивление при изгибе, кГ/см^2.

6.12. Натяжение трубопровода необходимо применять при укладке на большие глубины для поддержания нижнего провисающего участка трубопровода.

Продольное усилие, приложенное к трубопроводу, уменьшает кривизну вогнутого нижнего участка трубопровода и, следовательно, уменьшает напряжения в нем.

Натяжение трубопровода осуществляют натяжным устройством, расположенным на барже на сварочно-монтажной эстакаде между рабочими постами.

На рис.24 приведена схема натяжного устройства, применяемого на некоторых трубоукладочных баржах за рубежом.

Расчеты трубопровода при укладке с баржи при помощи прямолинейного стингера приведены в приложении 4.

6.I3. Чтобы избежать чрезмерного изгиба и возможного повреждения трубы, необходимо обеспечить надежную работу и строгий контроль системы натяжения трубопровода. Горизонтальная составляющая натяжения сообщает дополнительную нагрузку якорной системе баржи, следовательно, требуется высокая надежность якорной системы, так как даже незначительное скольжение носовых якорей может привести к повреждению трубопровода на вогнутом участке.

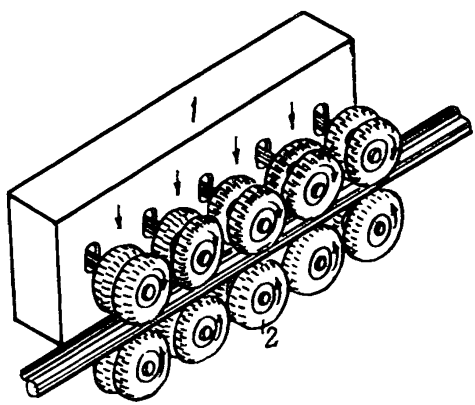

Рис.24. Устройство для натяжения трубопровода:
I-механизм для приложения вращающего момента к колесам и прижатия колес к трубе; 2-пневматические шины

6.I4. В процессе опускания трубопровода все параметры трубоукладочной системы необходимо непрерывно контролировать, чтобы обеспечить безаварийную укладку трубопровода.

Незначительное изменение в весе погруженного трубопровода, если не регулировать плавучесть стингера и изменение расчетного тягового усилия, могут привести к поломке укладываемого трубопровода.

Контроль за работой трубоукладочной системы включает измерение и регистрацию следующих параметров:

глубины моря в месте укладки;

глубины погружения конца криволинейного стингера;

длины провисающего участка трубопровода;

глубины погружения точки касания трубопровода с прямолинейным стингером;

угла наклона трубопровода в месте схода со стингера (для шарнирного стингера он равен углу наклона последнего сегмента, для прямолинейного стингера-его углу наклона);

величины усилия в системе натяжения трубопровода.

6.15. При неблагоприятной погоде следует временно прекратить укладку и опустить трубопровод на дно.

При небольших глубинах опустить трубопровод на дно можно при помощи кран-балок, расположенных вдоль борта баржи со стороны монтажной эстакады.

Если трубопровод укладывают с приложением натяжения, то его подготавливают для погружения на дно, приваривая на конце временную заглушку и приспособления для закрепления троса. Натянутый трос присоединяют к концу трубопровода и, когда его разматывают при движении баржи вперед, поддерживают в нем постоянное натяжение.

Таким образом, трубопровод опускают на дно, сохраняя в нем заданное натяжение, передаваемое тросом.

При спуске трубопровода на дно длина поддерживаемого стингером участка трубопровода при движении баржи вперед постепенно уменьшается. В случае, если применяют длинный жесткий стингер, необходимо уменьшать его плавучесть при перемещении трубы, чтобы избежать возникновения излишней положительной плавучести системы. В противном случае избыточная плавучесть может поднять вогнутый участок трубопровода, вызывая в нем большие деформации изгиба.

Шарнирный стингер позволяет проводить операции по погружению трубопровода непрерывно без регулирования плавучести.

Перемещение баржи, размотку троса с сохранением в нем постоянного натяжения следует выполнять при помощи автоматической системы управления.

Конец уложенного трубопровода обозначают буем.

Работу по подъему опущенного трубопровода ведут в обратном порядке.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ТЕХНОЛОГИЯ ЗАГЛУБЛЕНИЯ МОРСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

Основным мероприятием по защите морского трубопровода от разрушающего действия волн, течений, судовых якорей и размывов дна является заглубление его в грунт.

Необходимость и величина заглубления трубопровода определяются проектом в зависимости от:

гидрологических условий района;

конструкции трубопровода;

условий судоходства в районе трассы подводного трубопровода. На прибрежных морских участках с глубинами до 4 м трубопроводы, как правило, заглубляют.

Установлено, что для надежного предохранения трубопровода от льдов воздействий достаточно заглубить его на 2-4 м.

Заглубление трубопровода может быть выполнено либо путем предварительной разработки траншей (до укладки трубопровода) морскими земснарядами, либо разработкой траншей трубозаглубительным снарядом под уложенным на дно трубопроводом.

При предварительной разработке подводной траншеи морскими земснарядами минимальную ширину траншеи назначают не менее 30-50 м. Для конкретных условий строительства ширина траншеи зависит от конструкции земснаряда и технологии разработки траншеи, заносимости траншеи под действием волн и течений, способа укладки трубопровода на дно.

Разработку подводных траншей в морских условиях, как правило, могут выполнять земснаряды трех типов:

I) морские многочерпаковые снаряды, работающие с шаландами;

2) морские саморазгружающиеся землесосные снаряды;

3) морские грейферные снаряды.

Применение морских земснарядов ограничено их конструктивными возможностями (районом и дальностью плавания, глубиной опускания рабочего органа, габаритами снаряда и т.п.), гидрологическими условиями (волнение, течение), объемами работ.

Наибольшие сложности по разработке траншей возникают на прибрежных мелководных участках. Глубина воды в траншее для

снарядов Министерства морского флота РСФСР, как правило, должна составлять не менее 4,0 м. Ширина подводной траншеи для прохода многочерпакового снаряда, рабочих перемещений снаряда при папильонажном способе разработки, маневров грунтовозной шаланды и вспомогательного флота должна составлять около 60-70м.

В зависимости от глубины воды минимальные объемы разрабатываемого грунта из условия прохода черпакового снаряда по прорези могут составлять 150-250 $м^3$ на 1 м траншеи. Многочерпаковый снаряд производительностью 1000 $м^3$ грунта в час разрабатывает при круглосуточной работе около 50 ÷ 100 м траншеи в сутки.

Для саморазгружающихся землесосных снарядов требуется меньшая ширина траншеи, чем для черпаковых, однако их недостатком является периодичность работы; перерывы могут быть особенно продолжительными при большой протяженности мелководного участка, когда места свалки грунта удалены от мест разработки.

Сохранность проектных отметок подводной траншеи в большой степени зависит от морских течений и волновых условий в районе строительства. Как показал опыт сооружения перехода через пролив Невельского, в результате волнений, особенно при сильных штормах, траншея на мелководных участках полностью заносится.

Предварительную разработку подводных траншей земснарядами целесообразно выполнять на переходах небольшой протяженности (порядка нескольких километров); работы следует вести в период года с наименьшим количеством штормовых дней.

При предварительной разработке подводных траншей морскими земснарядами размеры траншей во много раз превосходят минимально необходимые для укладки трубопровода вследствие технологических запасов (определяемых конструкцией снаряда и технологией работ), запасов на заносимость, на неточность укладки трубопровода по створу и т.д.

Линейная скорость разработки подводных траншей земснарядами невелика, поэтому при строительстве морских трубопроводов большой протяженности практически невозможно отрыть траншею на всю длину перехода до укладки трубопровода.

Для заглубления морских трубопроводов целесообразно использовать специальные трубозаглубительные снаряды.

Трубозаглубительные снаряды позволяют в десятки раз уменьшить объемы подводных земляных работ при строительстве морских трубопроводов по сравнению с объемами, выполняемыми морскими земснарядами, значительно сокращают сроки, трудовые затраты и стоимость сооружения перехода, они обеспечивают надежное заглубление трубопровода в дно на глубинах, не доступных для земснарядов. Использовать трубозаглубительные снаряды можно, если труба имеет гладкое и прочное покрытие (например, бетонное).

В практике строительства морских трубопроводов за рубежом (США, Франция, Япония, Англия и др.) в настоящее время применяются трубозаглубительные снаряды различной конструкции, отличающиеся главным образом по способу воздействия на разрабатываемый грунт [15] .

На рис.25 приведена классификация траншейных трубозаглубительных снарядов по способам воздействия на грунт, а в табл. 3 приведены их технические характеристики.

Выбор того или иного конструктивного решения зависит от условий применения трубозаглубительного снаряда и, в первую очередь, объемов и темпов работ, категории разрабатываемых грунтов, глубин воды на участке перехода, диаметра трубопровода и величины заглубления его в грунт.

Трубозаглубительные снаряды могут быть предназначены для многократного использования при укладке трубопроводов различного диаметра в обширной морской акватории с самыми разнообразными гидрологическими и грунтовыми условиями, а также для ограниченного (по глубинам, категории грунтов, диаметру трубопровода) или разового использования на отдельных объектах, где их применение обосновано технико-экономическим расчетом.

К первым трубозаглубительным снарядам предъявляются требования универсальности, ко вторым требования определяются конкретными условиями производства работ.

При большой протяженности морского трубопровода (несколько десятков километров) и ограниченных сроках строительства трубозаглубительные снаряды применяют совместно с трубоукладочными баржами, которые определяют темп укладки; все работы выполняют одним потоком, поэтому производительность заглубления трубопровода должна соответствовать производительности его укладки.

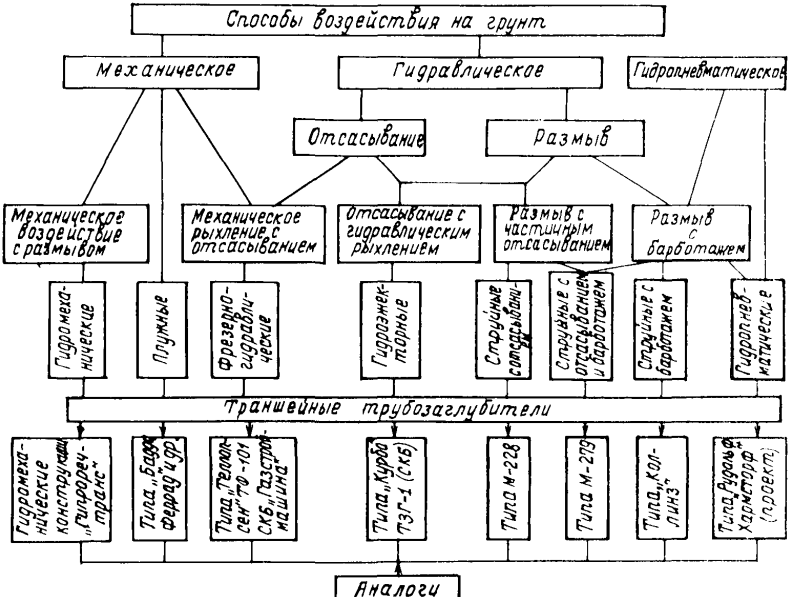

Рис.25. Классификация траншейных трубозаглубителей по способам воздействия на грунт

Таблица 3

Фирма (наименование трубозаглубителя)	Тип трубозаглубителя	Условия плавания и работы снаряда	Диаметр заглубляемого трубопровода, мм	Максимальная глубина опускания рабочего органа, м	Характеристика разрабатываемых грунтов	Заглубление трубопровода за одну проходку, м	Скорость (м/ч) проходки при глубине траншеи H (м)		Состав команды, чел.	Стоимость снаряда
							в легких грунтах (пески, илы)	в глинистых грунтах		
Гидравлические трубозаглубители										
"Браун энд Рут" (США) М-279	Струйный	Открытое море	До I200	60	Все, кроме скальных	I-3,0	385 при H = 2	77 при H = 2	60	8 млн.амер. долл.
"Браун энд Рут" (США) М-228	Струйный	Открытое море, прибрежные воды, большие реки	600-I000	38	Пески, илы, глины	До I,8	300 при H = I,8	30 при H = I,8	40	2 млн.амер. долл.
"Коллинз" (США)	Струйный	Морские воды и реки	300-650	40	Пески, илы, глины	0,6-I,2	I00 при H = I,2	I0 при H = I,2	-	-
"Курбо" (Франция)	Гидроэжекторный	Прибрежные морские воды	300-800	50	Песчано-гравелистые с примесью глины до 30%	I,0-5,0	5 при H = 5 75 при H = I,0	-	На одну смену I2 чел.	9,5 млн.франц. франков
"Джапан Си" (Япония)	Гидроэжекторный	Прибрежные морские воды	350-800	50	Пески 50-60%, глины до 20%, илистые частицы 30%	До 3,0	До 20-25 при H = 3	-	-	0,4 млн.амер. долл.
"Гипроречтранс" (СССР) опытный образец	Гидроэжекторный	Реки и водоемы	800	22	Пески, илы	I-I,5	300 при H = I	-	На одну смену 5-6 чел.	-
Трубозаглубители с механической разработкой (рыхлением грунта)										
"Бадди Перрод" (США)	Плужный	Прибрежные морские воды, реки	До 254	До I8	Пески и глины	I,5	I080 при H = I,5	-	-	-
"Теллепсен" (США)	Фрезерно-гидравлический	Прибрежные морские воды и реки	6I0	28	Пески и глины	0,75	-	-	-	-
"Объединение газопроводов" (США)	Фрезерно-гидравлический	Прибрежные морские воды	-	-	Пески, глины	До I,0	36 при H=I	-	-	-
"Гипроречтранс" (СССР) опытный образец	Фрезерно-гидравлический	Реки и водоемы	800	-	Пески и глины	0,6-I,0	25-30 при H = I,0	20 при H = I,0	-	-
СКБ "Газстроймашина" (СССР) проект	Фрезерно-гидравлический	Реки и водоемы	720-I020	-	Пески и глины	До I,0	30 при H = I,0	20 при H = I,0	На одну смену 5 чел.	66 тыс.руб.

Конструктивно трубозаглубительные снаряды состоят из плавучей базы, рабочего органа (трубозаглубителя), соединительных шлангов, кабелей, подающих к рабочему органу воду, воздух, гидрожидкость, электроэнергию.

На плавучей базе размещают силовые и энергетические установки, рабочие насосы, компрессоры, крановое оборудование для установки трубозаглубителя на трубопровод и подъема его на палубу, якорные лебедки, приборы контроля и управления снарядом, бытовые и вспомогательные помещения, танки с горючим.

Размеры плавучей базы определяют из условий плавания судна, мощности установленного на нем оборудования.

Как правило, плавучие базы трубозаглубительных установок несамоходные и буксируются к месту строительства вспомогательными судами.

В табл. приведены некоторые характеристики плавучих баз баржных трубозаглубительных снарядов.

Трубозаглубитель непосредственно разрабатывает и удаляет грунт из-под уложенного трубопровода.

Основные элементы трубозаглубителя:

несущая конструкция, на которой монтируют все основные узлы;

опорные и фиксирующие катки;

рабочие элементы: гидромониторные насадки, фрезы, грунтососы;

стабилизаторы, обеспечивающие устойчивое положение рабочего органа на трубопроводе в процессе его работы;

устройства, предназначенные для передачи информации о положении рабочего органа на трубопроводе и в забое.

Успешная работа трубозаглубителя зависит от правильного конструктивного решения каждого из этих элементов и от общей их компоновки.

Принципиальное конструктивное решение трубозаглубителя зависит от способа разрушения и удаления грунта. Наибольшее распространение получили следующие трубозаглубители:

струйные;

гидроэжекторные;

фрезерно-гидравлические.

Таблица 4

Фирма (марка трубозаглубителя)	Условия плавания	Размеры плавучей базы, м			Крановое оборудование		Якорное оборудование			Способ передвижения плавучей базы
		длина	ширина	осадка	грузоподъемность, Т	кол-во	вес якоря, т	кол-во	якорная лебедка	
"Браун и Рут" (США) М-279	Открытое море	91,4	27,4	Миним. 3,5	90,0 60,0	I I	I0	8	-	Несамоходная
"Браун и Рут" (США) М-228	Открытое море	76,0	I8,3	4,9	-	-	4,54	8	-	Несамоходная
"Коллинз" (США)	Реки и озера	27,0	9,0	I,0	-	-	-	4	-	Несамоходная
"Курбо" (Франция)	Морские прибрежные воды	40,0	I2,0	2,5	30,0	I	2,0	4	5 Т; I0 м/мин	Самоходная
"Джапансм" (Япония)	Морские прибрежные воды	22,0	I0,5	I,2	3	I	2,5	6	5 Т; I0 м/мин	Несамоходная

В струйных трубозаглубителях основную работу по размыву и выносу грунта из траншеи выполняют высоконапорные струи давлением до 70 кГ/см^2, которые формируются в насадках, расположенных в головной части трубозаглубителя.

Для интенсификации процесса выноса грунта из траншеи в струйных трубозаглубителях используют сжатый воздух. Часть грунта (до 10%) удаляют из траншеи отсасыванием.

Струйные трубозаглубители, применяемые в американской практике, характеризуются высокой производительностью разработки траншей, простотой и надежностью конструкции и позволяют заглублять трубопроводы в любые грунты, кроме скальных. Струйные трубозаглубители требуют больших расходов, давления воды и больших мощностей. Удельные мощности на разработку 1 м^2 грунта зависят от суммарной полезной мощности и с увеличением последней уменьшаются.

В гидроэжекторных трубозаглубителях для рыхления грунтов применяют струи воды среднего давления (12-20 кГ/см^2). Отсасывание грунта осуществляют при помощи гидравлических эжекторов или пневматических грунтососов.

Мощности, затрачиваемые на размыв и отсасывание грунта, примерно равны. Суммарные мощности, затрачиваемые на работу гидроэжекторных трубозаглубителей, в 5-10 раз меньше, чем на работу струйных трубозаглубителей.

Удельные мощности на разработку 1 м^3 песчаного грунта примерно такие же, как и для струйных трубозаглубителей, в зависимости от конструкции они составляют 2-3 лс/м^3 грунта.

Разработанные к настоящему времени гидроэжекторные трубозаглубители могут эффективно работать только на песчаных грунтах или на песчаных грунтах с примесью глины до 30%.

Гидроэжекторные трубозаглубители, как и струйные, характеризуются простотой и надежностью в работе.

Фрезерно-гидравлические трубозаглубители позволяют разрабатывать не только рыхлые, но и связные грунты. Основными его рабочими элементами являются фрезы, осуществляющие рыхление песчаных и разрушение связных грунтов и подачу грунта к отсасывающим наконечникам. Удельные мощности на разработку связных грунтов для фрезерно-гидравлических трубозаглубителей в несколько раз меньше, чем для струйных. Возможности применения

фрезерных трубозаглубителей ограничены из-за конструктивной сложности, недостаточной надежности в работе, большого веса и технологических неудобств, из-за небольшой величины заглубления за одну проходку.

Анализ зарубежного опыта строительства морских трубопроводов, показывает, что при больших объемах работ, высоких темпах прокладки, сложных гидрологических и геологических условиях наиболее эффективными являются струйные трубозаглубители, такие как американские типа М-228 и М-279, которые позволяют заглублять трубопроводы в любых грунтах (кроме скальных) за одну проходку снаряда.

При ограниченных объемах работ на переходах с легкими (песчаными и глинистыми) грунтами могут применяться гидроэжекторные трубозаглубители. Для эффективного использования таких трубозаглубителей необходимо иметь надежные данные о геологии дна.

Фрезерные трубозаглубители целесообразно использовать для заглубления морских трубопроводов небольшой протяженности в основном на прибрежных мелководных участках с разнообразными грунтовыми условиями, когда применение струйных или гидроэжекторных трубозаглубителей либо технически невозможно (из-за малых глубин или тяжелых грунтов), либо нерентабельно.

На мелководных участках, не доступных для подхода плавучей базы, заглубление трубопровода можно выполнять способом, аналогичным запатентованному в США (кл 6I-72.4 F02f, № 3429I3I). По этому способу на уложенный трубопровод устанавливается фрезерно-гидравлический трубозаглубитель, который работает от оборудования (насос, гидросистема), установленного на тракторе выше горизонта воды.

По мере разработки траншеи трактор с трубозаглубителем перемещаются вдоль трубопровода. Работа трубозаглубителя возможна при тихой погоде.

Для заглубления трубопроводов диаметром до 300 мм на величину I-I,5 м в прибрежных водах могут применяться плужные трубозаглубители. Заглубление трубопровода можно выполнять одновременно с его протаскиванием (в этом случае плужный трубозаглубитель закрепляется на оголовке трубопровода) либо после укладки трубопровода путем протаскивания по нему плужного трубозаглубителя при помощи лебедки, установленной на барже.

Основным показателем работы трубозаглубительных снарядов является линейная скорость разработки траншеи с определенной глубиной забоя, которая зависит от производительности разработки грунта и размеров траншеи.

Производительность разработки грунта для струйных трубозаглубителей зависит от расхода и напора воды, подаваемой на размыв.

Для песчаных грунтов характерно следующее приближенное соотношение

$$П = Q^{1,5} \cdot H^{3/4}, \qquad (13)$$

где $П$ - производительность разработки грунта;

Q - расход воды, подаваемой на размыв;

H - напор размывающих струй.

Производительность разработки грунта для гидроэжекторных и фрезерно-гидравлических трубозаглубителей определяется производительностью на всасывающей линии, которая зависит от конструкции всасывающего и рыхлительного устройств, производительности отсасывающих насосов (при гидроэжекторах) или компрессоров (при пневмогрунтососах), а также условий работы (глубины воды, высоты забоя и т.д.).

Размеры подводной траншеи, разрабатываемой трубозаглубителем, зависят от вида грунта, его плотности, глубины траншеи, диаметра трубопровода, конструкции трубозаглубителя. При прочих равных условиях важным фактором, влияющим на размеры подводной траншеи и, следовательно, на линейную производитель - ность заглубления, является скорость проходки.

При большой скорости проходки, составляющей для американских трубозаглубителей М-228 и М-279 1,5-3,0 м/мин. траншея в песчаных грунтах имеет крутые откосы с коэффициентом заложения 1,0-0,5. При скорости проходки менее 0,5 м/час заложение откосов приближается по величине к заложению установившегося откоса и составляет 2-2,5.

Величина заглубления трубопровода в дно после проходки трубозаглубителя зависит от высоты разрабатываемого забоя, а также при действии морских течений-от заносимости траншеи.

При большой линейной скорости проходки величины заглуб-

ления трубопровода и разрабатываемого забоя близки друг к другу, так как оползание откосов и заносимость траншеи невелики, при малой скорости проходки трубозаглубителя траншея может быть частично занесена. Наиболее совершенные трубозаглубители могут разрабатывать траншею глубиной до 5 м, что позволяет заглубить трубопровод за одну проходку снаряда.

Если заглубление трубопровода за одну проходку невозможно, (из-за конструктивных возможностей снаряда или по условиям расчета трубопровода на прочность или из-за сильной заносимости), то целесообразно применить два трубозаглубительных снаряда, движущихся один за другим, при этом глубина забоя для каждого должна задаваться с таким расчетом, чтобы объемы разрабатываемого грунта и линейная скорость снарядов были примерно одинаковыми.

СПОСОБ УКЛАДКИ ТРУБОПРОВОДА СВОБОДНЫМ ПОГРУЖЕНИЕМ С ПОНТОНАМИ ПЕРЕМЕННОЙ ПЛАВУЧЕСТИ И ПРИЛОЖЕНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ К УКЛАДЫВАЕМОМУ ТРУБОПРОВОДУ (МЕТОД S-ОБРАЗНОЙ КРИВОЙ)

Укладку трубопровода методом S-образной кривой можно применять при любых глубинах. Этот способ укладки целесообразен в тех случаях, когда невозможно заякоривать укладочную баржу донными якорями.

Экспериментальная укладка подводного трубопровода диаметром 219 мм на глубину 2600 м, выполненная французской компанией "Газ де Франс" методом S-образной кривой, доказала возможность сооружения трубопроводов на больших глубинах, на которых обычные методы укладки оказываются непригодными.

К преимуществам данного метода укладки относится сокращение до минимума количества плавучих средств.

Небольшой объем работ в море значительно уменьшает опасность повреждения трубопровода при сильном волнении и ветре тем более, что трубопровод может быть опущен на это время на дно, а на поверхности оставлен только один понтон.

Во время буксировки плети поддерживают понтонами на глубине порядка 15 ÷ 20 м, что позволяет вести работы даже при значительном волнении моря.

Стоимость укладки методом S-образной кривой существенно зависит от глубины в связи с необходимостью применения сложных облегчающих устройств и труб из высокопрочных марок стали. Увеличение диаметра труб осложняет и удорожает строительство.

Укладка трубопровода по методу S-образной кривой заключается в следующем (рис.26):

трубы сваривают на береговой сварочной базе в отдельные секции, которые затем спускаются на воду;

секции, если их длина недостаточна, соединяют в плети длиной до 3000 м, которые буксируют затем к месту укладки;

каждую новую плеть присоединяют к уже уложенной части

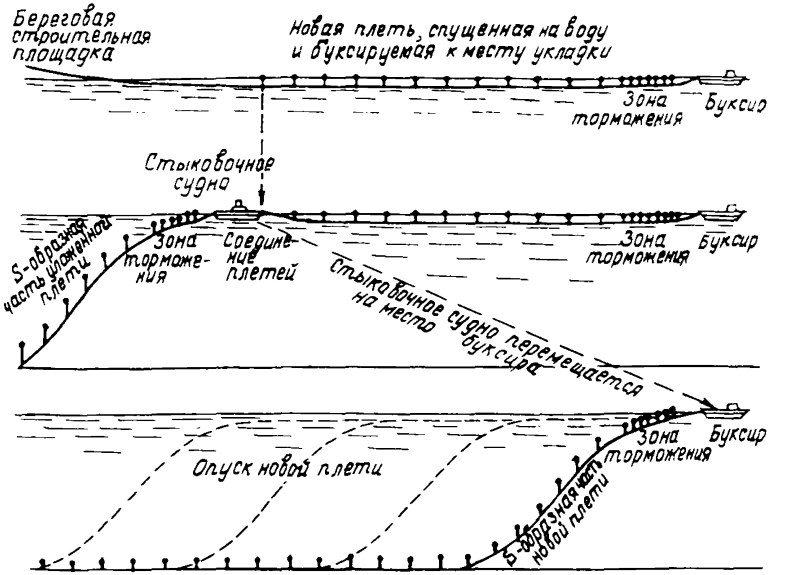

Рис.26. Схема укладки трубопровода по методу S-образной кривой

трубопровода и опускают на дно, причем конец плети поддерживают на поверхности воды специальными тормозными понтонами, чтобы иметь возможность присоединить ее к следующей плети;

плети соединяют на судне, оборудованном специальной системой управления с поворотными винтами, обеспечивающей его неизменное положение, несмотря на течение и ветры;

натяжение для создания безопасного радиуса кривизны трубопровода в процессе его погружения обеспечивают буксиром, к которому крепят трос от головной части укладываемой плети.

В процессе погружения трубопроводу следует придать такую конфигурацию, при которой он плавно сопрягался бы с дном и поверхностью воды. Для этого нижняя часть трубопровода должна обладать отрицательной плавучестью, а верхняя положительной. Под действием натяжения буксира трубопровод принимает форму

S -образной кривой, сопряжение дуг которой происходит в точке, в которой плавучесть трубопровода равна нулю.

Изменения плавучести трубопровода достигают за счет использования специальных понтонов, наполненных воздухом или азотом. В процессе погружения, когда давление воды становится равным давлению в понтоне, газ начинает сжиматься. Вследствие этого по мере погружения плавучесть понтонов, а следовательно и трубопровода, постепенно уменьшается.

В качестве понтонов могут быть использованы цилиндрические емкости, удерживающиеся в вертикальном положении и имеющие в нижней части клапан, который перемещается в трубке.

У поверхности воды под действием давления сжатого газа, находящегося в емкости, клапан прижимается к седлу, обеспечивая герметичность.

Как только внешнее давление превысит давление в понтоне, клапан поднимается и некоторый объем воды входит в понтон.

При подъеме понтона сжатый газ вытесняет воду и клапан вновь садится на седло, закрывая выход сжатому газу.

На большой глубине газ сжимается так, что понтоны теряют плавучесть, поэтому необходимо компенсировать вес оболочки понтона несжимаемым облегчающим материалом, который может находиться непосредственно в понтоне.

Если длина участка трубопровода, заключенного между поверхностью воды и дном велика (при глубинах больше 200 м), жесткостью трубопровода можно пренебречь и для расчета необходимых параметров укладки трубопровода использовать уравнения цепной линии.

Разность между силами натяжения трубопровода на поверхности и дне определяют в общем виде из выражения

$$T_н - T_к = \int_0^H p(y)\,dy, \qquad (14)$$

где $T_н$ – натяжение трубопровода на поверхности воды, кГ;

$T_к$ – натяжение трубопровода на дне, кГ;

$p(y)$ – плавучесть единицы длины трубопровода на глубине y, кГ/м

H – глубина укладки трубопровода, м.

Обозначим

h - давление воздуха, наполняющего понтоны, м вод.ст;

p - вес одного метра трубопровода в воде, кг;

V_1 - объем воздуха в расчете на I м трубопровода, л.

Выражение (I4) после некоторых преобразований записываем в виде

$$T_H - T_N = pH - V_1\left[h + (h+10)\ln\frac{H+10}{h+10}\right] = Q, \quad (15)$$

Если величина $Q > 0$, трубопровод погружается, сохраняя неизменную конфигурацию, причем натяжение у поверхности больше натяжения у дна.

Если $Q \leq 0$, трубопровод не погружается.

В процессе укладки трубопровода необходимо соблюдать условие $Q > 0$, к концу укладки очередной плети $Q \leq 0$.

Условие равновесия записываем в виде

$$pH = V_1\left[h + (h+10)\ln\frac{H+10}{h+10}\right]. \quad (16)$$

Зная вес трубопровода под водой, давление воздуха, наполняющего понтоны, из уравнения (I6) можно определить емкость понтонов (в литрах) в расчете на I м трубопровода при его равновесии (V_p):

$$V_p = \frac{pH}{h + (h+10)\ln\frac{H+10}{h+10}}. \quad (17)$$

Если $V_1 \geq V_p$ трубопровод плавает, если $V_1 < V_p$, трубопровод погружается.

Чтобы остановить погружение плети, ее конец следует оснастить дополнительным числом тормозных понтонов, подъемная сила которых должна уравновесить силу Q .

Объем тормозных понтонов в расчете на I м трубопровода можно определить по формулам:

случай I $A > h$

$$V_2 = \frac{Q}{h + (h+10)\ln\frac{A+10}{h+10}}, \quad (18)$$

случай II $A = h$

$$V_2 = \frac{Q}{h} \; ; \qquad (19)$$

случай III $A < h$;

$$V_2 = \frac{Q}{A} \; ; \qquad (20)$$

где V_2 - объем тормозных понтонов в расчете на I м трубопровода, л;

A - глубина погружения начала участка с тормозными понтонами, м;

Q - разница между величинами натяжения на поверхности и на дне, определяется по формуле (I5).

В тот момент, когда начинают работать тормозные понтоны и погружение плети трубопровода прекращается, разность между натяжением на поверхности воды и на дне определяют по формулам:

для случая I

$$T_H - T_N = pH - V_1 \left[h + (h+10) \ln \frac{H+10}{h+10} \right] - V_2 \left[h + (h+10) \ln \frac{A+10}{h+10} \right] \qquad (21)$$

для случая II

$$T_H - T_N = pH - V_1 \left[h + (h+10) \ln \frac{H+10}{h+10} \right] - V_2 \, h \; ; \qquad (22)$$

для случая III

$$T_H - T_N = pH - V_1 \left[h + (h+10) \ln \frac{H+10}{h+10} \right] - V_2 \, A \; . \qquad (23)$$

Теоретический минимальный радиус кривизны цепной линии будет находиться на концах S-образной кривой, где она касается поверхности воды и дна.

В действительности с учетом жесткости трубопровода минимальный радиус изгиба, соответствующий максимальному изгибающему моменту в трубе, возникает на некотором расстоянии от поверхности дна. Вследствие определенной жесткости трубопровода радиус кривизны будет всегда больше вычисленного теоретически. Принятая расчетная схема S-образной кривой явля -

ется по сравнению с реальной более жесткой, что гарантирует определенный запас прочности в расчетах.

Обеспечение у дна и поверхности воды минимально допустимого радиуса изгиба является необходимым условием укладки трубопровода.

Радиус кривизны трубопровода у дна определяют по формуле

$$R_N = \frac{T_N}{P_q} \quad , \tag{24}$$

где R_N - радиус кривизны у дна, м;

T_N - натяжение на дне, кГ;

P_q - отрицательная плавучесть трубопровода на дне, кГ/м.

Отрицательная плавучесть трубопровода на дне равна

$$P_q = P - V_1 \frac{h+10}{H+10} \quad . \tag{25}$$

Радиус кривизны у поверхности воды (R_H) к моменту окончания укладки плети трубопровода определяют по формуле

$$R_H = \frac{T_H}{V_1 + V_2 - P} \quad . \tag{26}$$

Радиусы R_N и R_H не должны быть меньше допустимого радиуса кривизны, определяемого по формуле

$$R_{доп} = \frac{E r}{0{,}7\,\sigma_т} \quad , \tag{27}$$

где E - модуль упругости стали, кГ/см^2;

r - наружный радиус трубы, см;

$\sigma_т$ - предел текучести стали, кГ/см^2.

Из формулы (26) видно, что для обеспечения допустимого радиуса изгиба у поверхности воды следует ограничивать подъемную силу основных и тормозных понтонов во избежание слишком больших натяжений при укладке трубопровода.

В практических расчетах параметров укладки трубопровода необходимо вводить значительный коэффициент запаса, так как к статическим нагрузкам добавляются нагрузки динамические, вызываемые ветром, волнением моря и течением.

Пример расчета основных параметров укладки трубопровода по методу S -образной кривой

Исходные данные:
глубина укладки H = 300 м;
стальной газопровод диаметром 325 х I2 мм;
предел текучести $\sigma_т$ = 3600 кГ/см^2;
вес I м трубопровода под водой p = I0 кг.
Основные и тормозные понтоны заполнены воздухом под давлением 2 кГ/см^2, h = 20 м.

По формуле (I7) находим V_p

$$V_p = \frac{I0 \cdot 300}{20 + 30 \ \ell n \frac{300 + I0}{20 + I0}} = 33 \text{ л}.$$

Принимаем объем основных понтонов в расчете на I м трубопровода V_1 = 30 м.

По формуле (I5) определяем разность натяжения трубопровода на поверхности воды и на дне в процессе укладки

$$Q = I0 \cdot 300 - 30 \left[20 + 30 \ \ell n \frac{3I0}{30} \right] = 300 \text{ кГ}.$$

Допустим, максимальная глубина погружения тормозного понтона A = 20 м.

Объем тормозного понтона в расчете на I м трубопровода определяем по формуле (I9)

$$V_2 = \frac{300}{20} = I5 \text{ л}.$$

По формуле (27) найдем допустимый радиус кривизны трубопровода

$$R_{доп} = \frac{2 \cdot I \cdot I0^6 \cdot I6,25}{0,7 \cdot 3600} = I34 \text{ м}.$$

С учетом коэффициента запаса I,5 примем расчетный радиус кривизны R_p = 200 м.

Из выражения (26) определяем необходимую величину натяжения трубопровода на поверхности воды к концу погружения плети

$$T_н = 200 \ (30 + I5 - I0) = 7000 \text{ кГ}.$$

В конце укладки плети натяжение трубопровода на поверхности равно натяжению на дне и составляет 7000 кГ.

Необходимую величину натяжения трубопровода на поверхности воды в процессе погружения найдем по формуле

$$T_н = R_1 (V_1 - P) = 200\ (30 - 10) = 4000 \text{ кГ}.$$

Силу натяжения трубопровода на дне в процессе погружения плети определим по формуле

$$T_N = T_н - Q = 4000 - 300 = 3700 \text{ кГ}.$$

Отрицательная плавучесть трубопровода на дне равна

$$P_g = 10\text{-}30\,\frac{20 + 10}{300 + 10} = 7{,}1 \text{ кГ/м}.$$

Радиус кривизны трубопровода на дне в процессе укладки равен

$$R_N = \frac{3700}{7{,}1} = 520 \text{ м}.$$

В качестве основных понтонов могут быть использованы понтоны емкостью 450 л, прикрепленные к трубопроводу через 15 м. На участке торможения могут быть применены эти же понтоны, расставленные с интервалом 10 м.

РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДА, УКЛАДЫВАЕМОГО НА БОЛЬШИЕ ГЛУБИНЫ МЕТОДОМ ЦЕПНОЙ ЛИНИИ

При разработке ВНИИСТом технико-экономического обоснования прокладки газопровода через Каспийское море рассмотрена возможность прокладки на глубину до 250 м.

С учетом заданной производительности перекачки газа можно проложить газопровод диаметром 200-300 мм, рассчитываемый на внутреннее давление 200-250 кГ/см^2.

Для строительства перехода можно использовать стальные трубопроводы или высокопрочные гибкие армированные пластмассовые трубопроводы (шлангокабели).

Укладка стального трубопровода может быть осуществлена с трубоукладочной баржи, имеющей специальную наклонную эстакаду или барабан большего диаметра с навитым на нем трубопроводом. Пластмассовый трубопровод можно также укладывать путем сматывания с барабана.

В обоих случаях к верхнему концу трубопровода приложено осевое растягивающее усилие, при помощи которого можно уменьшить изгибающие напряжения.

На глубинах 200 м и больше участок трубопровода от кормы трубоукладочной баржи (или барабана) имеет значительную длину, что позволяет рассчитывать его так же, как и пластмассовый трубопровод без учета жесткости.

На участке между дном моря и баржей упругая линия трубопровода, на который воздействует осевое растягивающее усилие, имеет вид цепной линии.

Расчетом необходимо установить следующие параметры:

напряжение в трубопроводе от изгиба и осевого натяжения;

минимально допустимый радиус кривой в точке касания трубопроводом дна;

величину растягивающего усилия;

геометрические размеры упругой линии трубопровода;

взаимозависимость этих параметров.

Расчетная схема трубопровода приведена на рис.27.

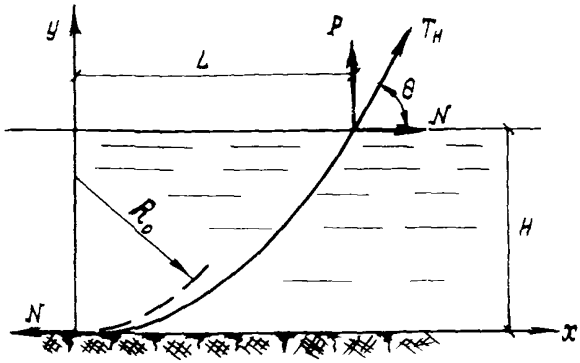

Рис.27 Расчетная схема трубопровода

В расчете и на рис.27 приняты следующие обозначения:

$T_н$ - растягивающее осевое усилие, действующее в трубопроводе на поверхности воды, кГ;

P - вертикальная составляющая силы $T_н$, кГ;

N - горизонтальная составляющая силы $T_н$, кГ;

R_o - радиус изгиба трубопровода в точке касания его с дном; м;

H - глубина моря в месте укладки, м;

θ - угол наклона трубопровода к горизонту на поверхности воды, град;

L - горизонтальная проекция цепной линии, м.

Уравнение цепной линии имеет вид

$$y = \frac{N}{p}\left(ch\,\frac{p}{N}x - 1\right), \qquad (28)$$

где p - вес I см трубопровода под водой (отрицательная плавучесть), кг.

Из уравнения (28) получим

$$ch\,\frac{p}{N}x = \frac{p}{N}y + 1; \qquad (29)$$

$$\frac{dy}{dx} = sh\frac{P}{N}x = \sqrt{\left(\frac{P}{N}y+1\right)^2 - 1} = \sqrt{\left(\frac{P}{N}y\right)^2 + \frac{2P}{N}y}\ ; \qquad (30)$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{P}{N}\,ch\,\frac{P}{N}x \qquad (31)$$

При X = 0 (в месте касания трубопровода дна)

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{P}{N}\ . \qquad (32)$$

Напряжения в трубопроводе при изгибе его по кривой с радиусом R равны

$$\sigma = \frac{E\,r}{R}\ , \qquad (33)$$

где E - модуль упругости, кГ/см^2;

r - наружный радиус трубы, см.

Радиус изгиба в точке касания трубопровода дна R_o

$$R_o = \frac{1}{\frac{d^2y}{dx^2}}\ .$$

Следовательно, из уравнения (32)

$$R_o = \frac{N}{P}\ ; \qquad (34)$$

$$N = R_o P\ . \qquad (35)$$

Горизонтальная составляющая (N) растягивающего усилия, определяемая из уравнения (35), будет действовать в любом сечении трубопровода на участке от дна до баржи.

Из уравнения (34)

$$\frac{N}{pH} = \frac{R_o}{H}\ . \qquad (36)$$

Из рассмотрения треугольника сил (см.рис.27)

$$T = N\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}\ . \qquad (37)$$

Подставляя значение $\frac{dy}{dx}$ из уравнения (30) в (37), получаем

$$T = N + py\ . \qquad (38)$$

На поверхности воды при $y=H$ и $T=T_н$ имеем

$$T_н = N + \rho H. \tag{39}$$

Подставляя значение N из (35) в (39), получаем

$$T_н = \rho (R_0 + H). \tag{40}$$

Отсюда

$$\frac{T_н}{\rho H} = 1 + \frac{R_0}{H}. \tag{41}$$

Подставляя значение R_0 из уравнения (34) в (30) и при $y=H$, получаем

$$tg\,\theta = \frac{H}{R_0}\sqrt{1+2\frac{R_0}{H}}. \tag{42}$$

Суммируя уравнения (29) и (30) при $x=L$ и $y=H$ и учитывая, что

$$Sh\frac{L}{R_0} + ch\frac{L}{R_0} = e^{\frac{L}{R_0}},$$

получаем

$$e^{\frac{L}{R_0}} = \frac{H}{R_0} + 1 + \sqrt{\left(\frac{H}{R_0}\right)^2 + \frac{2H}{R_0}}.$$

Откуда после умножения на $\frac{R_0}{H}$ получаем

$$\frac{L}{H} = \frac{R_0}{H}\,\ell n\left(1 + \frac{H}{R_0} + \sqrt{\left(\frac{H}{R_0}\right)^2 + \frac{2H}{R_0}}\right). \tag{43}$$

Для упрощения расчетов на рис.28 в соответствии с уравнениями (36), (41), (42) и (43) построены графики для безразмерных величин $\frac{N}{H} = \frac{R_0}{H}$; $\frac{T_н}{\rho H}$; $\frac{L}{H}$ и $tg\,\theta$ при $y=H$, в зависимости от отношения $\frac{R_0}{H}$.

Максимальные напряжения в трубопроводе в его сечении около дна с учетом изгиба по радиусу R_0 и растяжения силой N определяем из уравнения

$$\sigma_{макс} = \frac{E r}{R} + \frac{N}{F} \tag{44}$$

и соответственно минимально допустимый радиус кривой при

$$\sigma_{макс} = 0{,}7[\sigma_т];$$

$$R_{мин} = \frac{Er}{0{,}7\sigma_т - \frac{N}{F}}, \qquad (45)$$

где $\sigma_т$ – предел текучести стали трубы, кГ/см^2;
F – площадь поперечного сечения трубы, см^2.

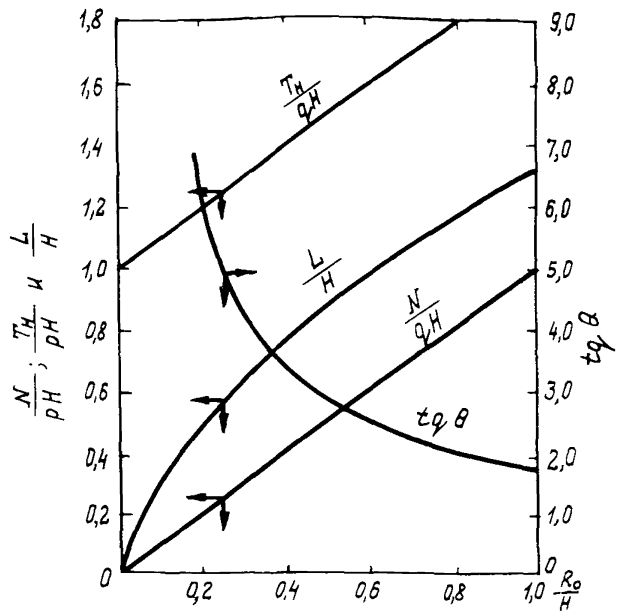

Рис.28. Графики безразмерных параметров для расчета трубопровода по уравнению цепной линии

Пример расчета стального газопровода, укладываемого по методу цепной линии, применительно к условиям прокладки через Каспийское море

Исходные данные:

максимальная глубина H = 200 м;
стальной газопровод диаметром 325 х I2 мм;

предел текучести $\sigma_т$ = 3600 кг/см^2;

вес I см трубопровода с бетонным покрытием под водой (отрицательная плавучесть) P = 0,30 кг;

допустимый радиус изгиба из уравнения (33)

$$R_o = \frac{E_т}{\sigma} = \frac{2{,}1 \cdot 10^6 \cdot 16{,}25}{0{,}70 \cdot 3600} = 13400 \text{ см.}$$

Отношение $\frac{R_o}{H} = \frac{134}{200} = 0{,}67$.

Согласно графикам на рис.28

$\frac{T_H}{pH} = 1{,}67$; $\frac{L}{H} = 1{,}04$; $\frac{N}{pH} = 0{,}67$; $tg\theta = 2{,}3$

и соответственно: $T_H = 1 \cdot 67 \cdot 0{,}30 \cdot 20000 = 10020$ кг;

$L = 1{,}04 \cdot 20000 = 20800$ см;

$N = 0{,}67 \cdot 0{,}30 \cdot 20000 = 4020$ кг;

$\theta = 66^0 30'$.

Продольные напряжения в нижнем сечении трубопровода от действия осевой силы N равны

$$\sigma_{пр} = \frac{N}{F} = \frac{4020}{117{,}9} = 33{,}5 \text{ кГ/см}^2.$$

Эти напряжения составляют около 1% от допустимых и их можно не учитывать.

Продольные напряжения в верхнем сечении трубопровода от действия осевой силы T_H, где нет изгиба трубопровода, равны

$$\sigma'_{пр} = \frac{T_H}{F} = \frac{10020}{117{,}9} = 85 \text{ кГ/см}^2.$$

Таким образом, при условии соблюдения во время технологического процесса укладки трубопровода на глубину 200 м минимального радиуса 134 м напряжения в трубопроводе не будут превосходить заданной расчетной величины.

На укладываемый трубопровод будут воздействовать дополнительные нагрузки, связанные с перемещениями трубоукладочной баржи, поэтому целесообразно увеличить значение минимального радиуса R_o.

Из графика (см.рис.28) следует, что при заданной глубине H

с увеличением R_0 (и, следовательно, увеличением $\frac{R_0}{H}$) возрастут расчетные значения осевого усилия T_H, проекция длины упругой линии L с одновременным уменьшением угла θ.

Для глубины H = 200 м с увеличением R_0 до 200 м получим следующие значения: T_H = 12 Т; L = 268 м; σ = 1700 кГ/см^2, равное 0,47 σ_T и N = 6 Т; θ = 60°.

Возможно также уменьшить действующие напряжения и расчетную величину осевого усилия путем уменьшения веса трубопровода под водой (его отрицательной плавучести). Отрицательная плавучесть трубопровода может быть уменьшена выбором оптимальных размеров толщин бетонного покрытия и стенки трубопровода, а также временным (на период укладки) закреплением разгружающих понтонов.

РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДА ПРИ УКЛАДКЕ С БАРЖИ ПРИ ПОМОЩИ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО СТИНГЕРА

БЕЗ ПРИЛОЖЕНИЯ РАСТЯГИВАЮЩЕГО УСИЛИЯ

На рис.29 приведена расчетная схема укладки трубопровода с баржи при использовании прямолинейного стингера без приложения натяжения. Трубопровод на провисающем участке от точки схода со стингера до точки касания дна рассчитывают как однопролетную балку на двух опорах.

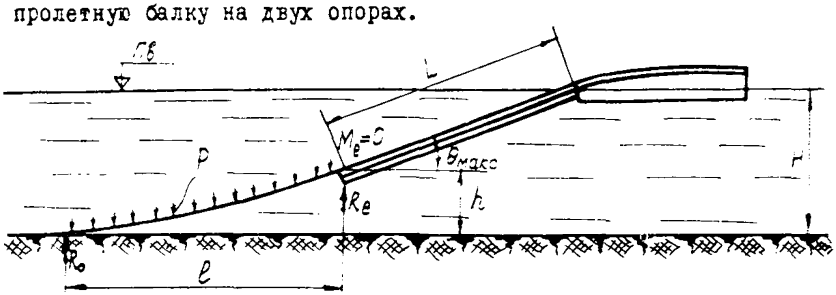

Рис.29. Расчетная схема укладки трубопровода с баржи с использованием прямолинейного стингера

Основные расчетные параметры укладки трубопровода можно определить по формулам, приведенным в табл.5.

Расчетные зависимости получены при решении приближенного дифференциального уравнения изогнутой оси при следующих граничных условиях:

угол наклона и изгибающий момент в точке касания трубопровода дна равны нулю;

изгибающий момент в точке касания трубопровода со стингером равен нулю.

Допустимая длина пролета ($\ell_{доп}$) провисающего участка трубопровода от точки схода со стингера до точки касания дна определена из условия, что максимальные напряжения изгиба в трубопроводе не должны превышать расчетного сопротивления при изгибе.

Таблица 5

Расчетные параметры	Расчетные формулы	Пример расчета для трубопроводов	
		диаметр 426 мм, толщина стенки I2мм	диаметр 720 мм, толщина стенки I2мм
Допустимая длина пролета провисающего участка $\ell_{доп}$, см	$\sqrt{\frac{8R_2W}{p}}$	8850	8770
Максимальная высота подъема трубопровода над дном в точке касания со стингером $h_{макс}$, см	$\frac{p\ell_{доп}^4}{24EJ}$	I460	850
Тангенс угла наклона оси трубопровода в точке касания его со стингером $tg\,\theta$	$\frac{p\ell_{доп}^3}{12EJ}$	0,33 (θ =I8°20')	0,I92 (θ = II°)
Максимальный изгибающий момент в пролете ℓ, $M_{макс}$, кГсм	$\frac{p\ell^2}{8}$	-	-
Момент в точке касания трубопровода со стингером M_ℓ, кГсм	0	0	0
Опорная реакция в точке касания трубопровода со стингером R_ℓ, кг	$0{,}5p\ell$	I770	5260
Максимальная глубина укладки трубопровода H см	$h_{макс}+L\sin\theta$	4600	2760

В расчетной схеме (см.рис.29) и формулах (см.табл.5) приняты следующие условные обозначения:

p - вес единицы длины трубопровода под водой, кг/см;

ℓ - пролет провисающего участка трубопровода от точки схода со стингера до точки касания дна, см;

h - расстояние от точки касания трубопровода со стингером до дна, см;

θ - угол наклона оси трубопровода к горизонту в точке касания со стингером, град;

R_0 - опорная реакция в точке касания трубопровода дна, кГ;

R_2 - опорная реакция в точке касания трубопровода со стингером, кГ;

M_2 - изгибающий момент в трубопроводе в точке касания его со стингером, кГ·см.

H - глубина укладки трубопровода, см;

L - длина стингера, см;

R_z - расчетное сопротивление при изгибе, кГ/см^2;

W - момент сопротивления трубы, см^3;

E - модуль упругости стали, кГ/см^2;

J - момент инерции трубы, см^4.

Пример расчета максимальной глубины укладки трубопроводов диаметром 426 и 720 мм с толщиной стенки 12 мм с трубоукладочной баржи, оборудованной прямолинейным стингером длиной 100 м.

Дано:

вес единицы длины трубопровода под водой (p) для трубопроводов диаметром:

426 мм, кГ/см	0,4
720 мм, кГ/см	1,2

моменты сопротивления W труб для трубопроводов диаметром:

426 мм, см^3	1569
720 мм, см^3	4629

расчетное сопротивление труб $R_2 = 2500$ кГ/см^2

(расчетные данные приведены в табл.5.)

В расчетах не учитывались:

волновые воздействия на трубопровод в процессе укладки;

динамическая нагрузка при качке трубоукладочной баржи;

воздействия морских течений.

Влияние указанных факторов учтено снижением расчетного сопротивления металла труб.

Максимальную глубину укладки трубопровода можно увеличить за счет:

применения труб с более высокими прочностными характеристиками;

уменьшения расчетного веса погонного метра трубопровода под водой на период укладки;

увеличения длины стингера;

приложения к трубопроводу растягивающего усилия.

С ПРИЛОЖЕНИЕМ РАСТЯГИВАЮЩЕГО УСИЛИЯ

Расчетная схема трубопровода показана на рис.30. Условные обозначения на расчетной схеме приведены выше. Горизонтальная составляющая растягивающего усилия N - постоянна в любом сечении трубопровода и равна натяжению трубопровода на дне.

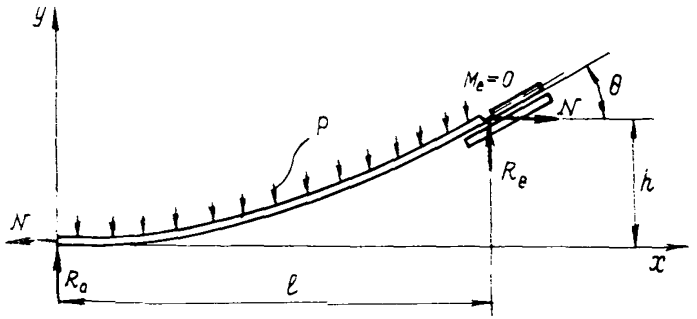

Рис.30. Расчетная схема укладки трубопровода с приложением растягивающего усилия

Трубопровод на провисающем участке рассчитываем как однопролетную балку на двух опорах, к которой приложено растягивающее усилие.

Запишем уравнение равновесия в виде

$$EJ\frac{d^4y}{dx^4} - N\frac{d^2y}{dx^2} = -p. \qquad (46)$$

Делаем замену переменной x, обозначив

$$\xi = \frac{x}{\ell}. \qquad (47)$$

Обозначим (48)

$$\varphi^2 = \frac{N\ell^2}{EJ}, \qquad (49)$$

$$a = \frac{pEJ}{N^2}$$

Уравнение (46) запишется в виде

$$\frac{d^4y}{d\xi^4} - \varphi^2 \frac{d^2y}{d\xi^2} = -a\varphi^4 \qquad (50)$$

Решение уравнения (50) получим в виде

$$y = C_1 + C_2\xi + C_3 sh\varphi\xi + C_4 ch\varphi\xi + \frac{PEJ}{2N^2}\varphi^2\xi^2 \qquad (51)$$

Произвольные постоянные C_I; C_2; C_3; C_4 найдем, используя следующие граничные условия

при $\xi = 0$ $\quad y = 0;\quad y' = 0;\quad y'' = 0;$

при $\xi = 1$ $\quad y'' = 0$

и решая систему уравнений:

$C_I + C_4 = 0;$

$C_2 + C_3\varphi = 0;$

$C_4\varphi^2 + \frac{PEJ}{N^2}\varphi^2 = 0;$

$C_3\varphi^2 sh\varphi + C_4\varphi^2 ch\varphi + a\varphi^2 = 0.$

При подстановке найденных значений C_I; C_2; C_3; C_4 в (51) получим

$$y = a - K\varphi\xi + K sh\varphi\xi - a ch\varphi\xi + \frac{a}{2}\varphi^2\xi^2; \qquad (52)$$

где $K = \frac{a(ch\varphi - 1)}{sh\varphi}$. (53)

При $\xi = 1$; $\quad x = \ell$; $\quad y = h$

имеем $$h = \frac{a}{2}\varphi^2 - K\varphi. \qquad (54)$$

Выражение для изгибающего момента в пролете запишется в виде

$$M = (K sh\varphi\xi - a ch\varphi\xi + a)N. \qquad (55)$$

Максимальный изгибающий момент в пролете можно определить по формуле

$$M_{макс} = \left(a - \sqrt{a^2 - K^2}\right)N. \qquad (56)$$

Тангенс угла наклона трубопровода в точке касания со стингером определяют по формуле

$$tg\,\vartheta = (2\varphi - 2\kappa)\frac{1}{\sqrt{\frac{EJ}{N}}} = \left[\frac{2(1-ch\varphi)}{sh\varphi} + \varphi\right]\frac{P\sqrt{\frac{EJ}{N}}}{N}, \qquad (57)$$

найденной из условия:

при $\xi = 1$; $\quad z' = tg\,\vartheta$

Для определения высоты подъема трубопровода над дном в точке касания со стингером и максимального изгибающего момента в пролете получены следующие выражения:

$$\left.\begin{aligned} h &= \frac{a}{2}\varphi^2 - \kappa\varphi \\ M_{макс} &= \left(a - \sqrt{a^2 - \kappa^2}\right)N, \end{aligned}\right\} \qquad (58)$$

где $\quad a = \frac{PEJ}{N^2}; \quad \kappa = \frac{a(ch\varphi - 1)}{sh\varphi}; \quad \varphi^2 = \frac{N\ell^2}{EJ}$

При известных величинах отрицательной плавучести трубопровода P и его жесткости EJ для любого значения N можно получить зависимость максимального момента $M_{макс}$ и высоты h от длины пролета ℓ.

Для упрощения расчета по формулам (58) искомые величины выражены в безразмерных параметрах M_1 и h_1

$$M_{макс} = \frac{M_1 P EJ}{N}; \qquad (59)$$

$$h = \frac{h_1 P EJ}{N^2}; \qquad (60)$$

$$M_1 = 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{ch\varphi_1}{sh\varphi}\right)^2}; \qquad (61)$$

$$h_1 = \frac{\varphi^2}{2} - \left(\frac{ch\varphi - 1}{sh\varphi}\right)\varphi. \qquad (62)$$

На рис.31, 32, 33 построены графики зависимости безразмерных параметров M_1 и h_1 от параметра $\varphi = \ell\sqrt{\frac{N}{EJ}}$

Пользуясь графиками на рис.31, 32, 33 и формулами (59) и (60) для конкретного трубопровода, задаваясь величиной горизонтального усилия N, можно определить величину h для любого значения $M_{макс}$ и наоборот, для любого значения высоты подъема трубопровода h величину максимального момента $M_{макс}$.

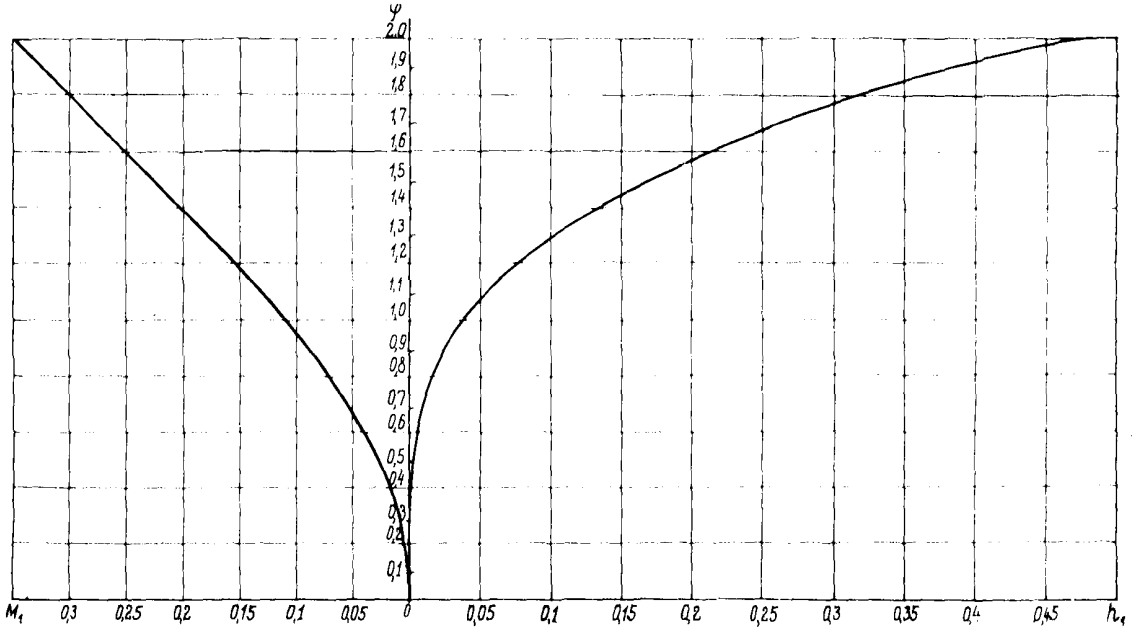

Рис.3I. График зависимости безразмерных параметров M_1 и h_1 от параметра φ

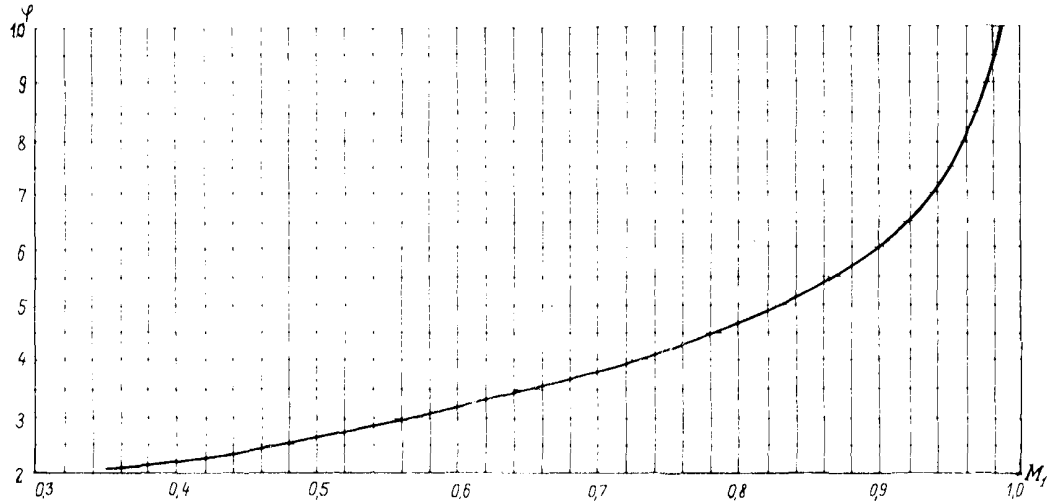

Рис.32. График зависимости безразмерных параметров M_1 и φ для значений φ от 2 до 10

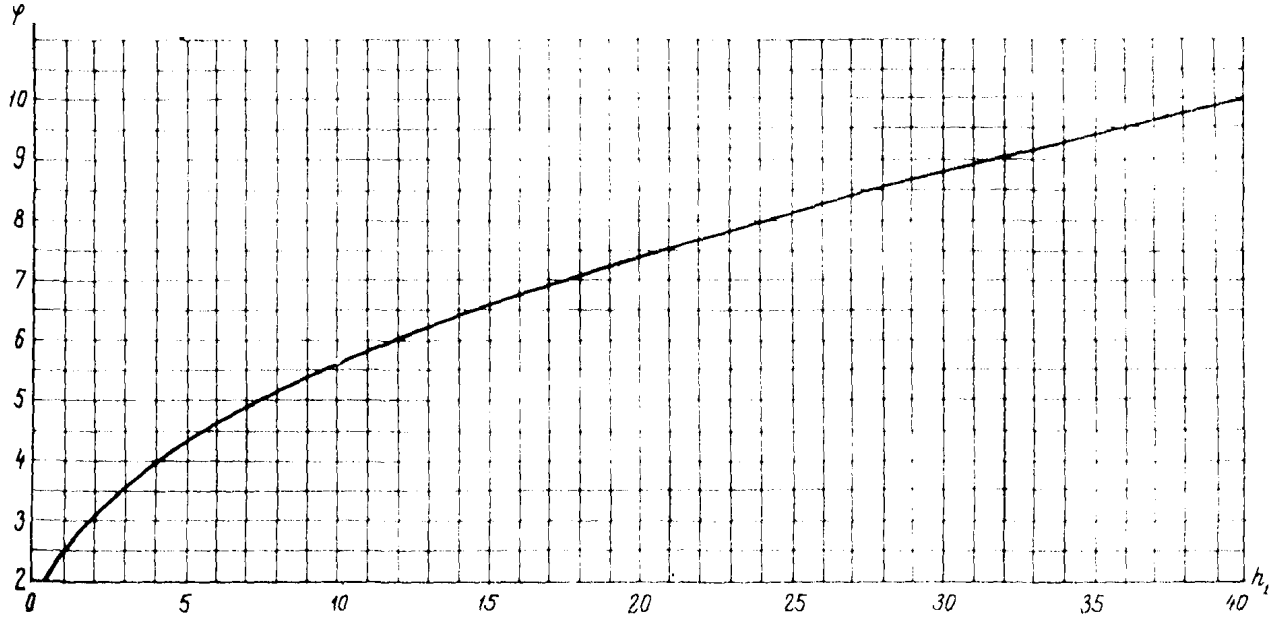

Рис.33. График зависимости безразмерных параметров h_1 и φ для значений ζ от 2 до 10

Поперечную силу в точке касания трубопровода дна (Q_c), равную **опорной реакции** (R_c), можно определить по формуле

$$Q_c = \left(\frac{ch\varphi - 1}{sh\varphi}\right) \sqrt{\frac{EJ}{N}}. \qquad (63)$$

Поперечную силу (Q_ℓ), действующую перпендикулярно оси трубопровода, в точке сасания со стингером определяют по формуле

$$Q_\ell = \left(\frac{1 - ch\varphi}{sh\varphi}\right) \sqrt{\frac{EJ}{N}} \qquad (64)$$

Опорную реакцию R_ℓ определяют из выражения суммы моментов всех сил относительно опорной точки

$$R_\ell = \frac{p\ell}{2} + \frac{Nh}{\ell}. \qquad (65)$$

Опорную реакцию R_c для проверки можно вычислить по формуле

$$R_c = \frac{p\ell}{2} - \frac{Nh}{\ell}. \qquad (66)$$

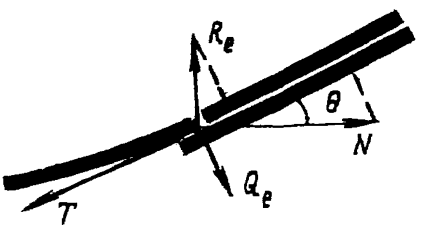

Рис.34. Схема сил, действующих в точке касания трубопровода со стингером

Силу натяжения T , действующую вдоль оси трубопровода, в точке касания его со стингером определяют как сумму проекций сил R_ℓ и N на ось трубопровода (рис.34).

Силу натяжения T определяют по формуле

$$T = R_\ell \sin\vartheta + N\cos\vartheta, \qquad (67)$$

где T – **продольная сила, действующая вдоль оси трубопровода в точке касания** со стингером, кГ;

R_ℓ – **опорная реакция в точке касания**, кГ;

N – **горизонтальная составляющая растягивающего усилия, кГ;**

ϑ – **угол наклона трубопровода в точке касания** со стингером, **град.**

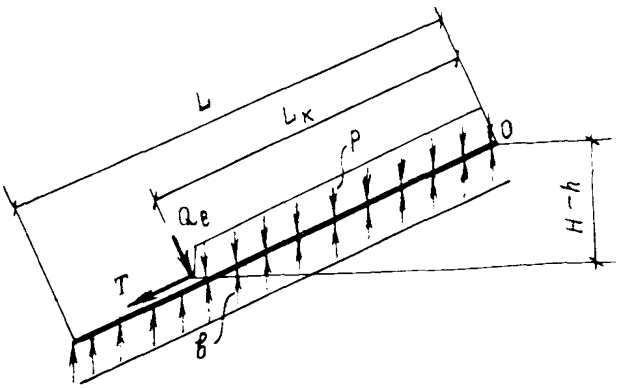

Рис.35. Расчетная схема для определения плавучести прямолинейного стингера

Плавучесть прямолинейного стингера можно определить из условия равенства нулю суммы моментов действующих сил относительно точки 0 (рис.35). При расчете плавучести стингера принято, что изгибающие моменты на обоих концах стингера равны нулю, плавучесть стингера равномерно распределена вдоль его длины.

Плавучесть стингера определяют по формуле

$$g = \frac{2Q_г L_к}{L^2 \cos^2\vartheta} + \frac{p L_к^2}{L^2}, \qquad (68)$$

где g – плавучесть единицы длины стингера, кГ/м;

$Q_г$ – поперечная сила в точке касания трубопровода со стингером, кГ;

L – длина стингера, м;

p – отрицательная плавучесть трубопровода, кГ/м;

ϑ – угол наклона стингера, град;

$L_к$ – длина линии контакта трубопровода со стингером, м

$$L_к = \frac{H - h}{\sin\vartheta} \qquad (69)$$

H – глубина укладки, м;

h – высота подъема трубопровода над дном в точке касания со стингером, м.

Проверку трубопровода по прочности выполняют из условия

$$\sigma \leq R_2 , \tag{70}$$

где σ - напряжения в трубопроводе;
R_2 - расчетное сопротивление металла труб.

Напряжения в трубопроводе определяют по формуле

$$\sigma = \frac{M_{макс}}{W} + \frac{T}{F} , \tag{71}$$

где $M_{макс}$ - максимальный изгибающий момент в трубопроводе;
W - момент сопротивления поперечного сечения;
T - растягивающее усилие в трубопроводе;
F - площадь поперечного сечения трубы.

Пример расчета укладки трубопровода с барки с приложением растягивающего усилия

Определить основные расчетные параметры при укладке трубопровода диаметром 426 х 12 мм с отрицательной плавучестью p = 0,40 кГ/см, укладываемого на глубину 60 м с применением прямолинейного стингера длиной 110 м.

На рис. 36 и 37 для различных горизонтальных усилий N построены графики зависимостей максимальных напряжений при изгибе и высоты подъема трубопровода над дном в точке касания со стингером (h) от угла наклона стингера (θ).

Графики построены по формулам (57), (59), (60) и графикам (рис.31, 32, 33). Напряжения вычислены по формуле

$$\sigma = \frac{M_{макс}}{W} . \tag{72}$$

На графиках пунктирными линиями ограничены минимально возможные углы наклона стингера, определенные из условия

$$h \geq H - L \sin\theta , \tag{73}$$

где H - глубина укладки равна 60 м;
L - рабочая длина стингера равна 100 м;
θ - угол наклона стингера.

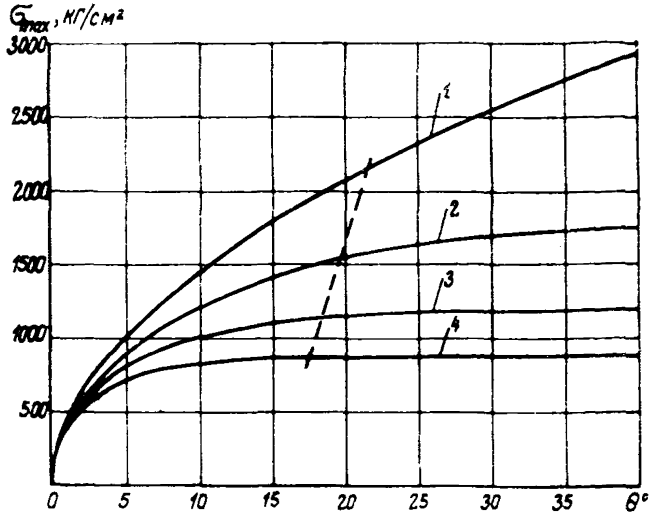

Рис.36. Зависимость максимальных напряжений при изгибе от угла наклона стингера для различных значений N :
I - N = 5 Т; 2 - N = I0 Т; 3 - N = I5 Т; 4 - N = 20 Т

Допустим, к трубопроводу приложено горизонтальное растягивающее усилие I5 Т.

Согласно графику на рис.37 угол наклона стингера не должен быть меньше I8,5°. Задаемся углом наклона стингера 20°. Согласно графику на рис.36 максимальные изгибающие напряжения в трубопроводе не превышают II50 кГ/см^2.

По графику на рис.37 для угла 20° и N = I5 Т находим h = 33 м.

Из выражения (60) определяем h,

$$h_1 = \frac{hN^2}{\rho E J} = \frac{3300 \cdot 15000^2}{0{,}4 \cdot 7 \cdot 10^{10}} = 26{,}5 \ .$$

По графику на рис.33 находим φ = 8,35.

Из выражения (48) определяем ℓ

$$\ell = \varphi \sqrt{\frac{EJ}{N}} = 8{,}35 \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10}}{15 \cdot 10^3}} = 180{,}5 \text{ м.}$$

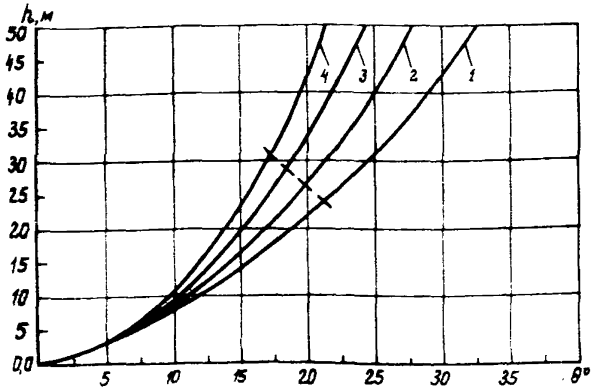

Рис.37. Зависимость высоты подъема трубопровода в точке касания со стингером от угла его наклона для различных N: I - N = 5 Т; 2 - N = I0 Т; 3 - N = I5 Т; 4 - N = 20 Т

По формуле (64) вычисляем Q_e

$$Q_e = \left(\frac{1-ch\varphi}{sh\varphi}\right) p\sqrt{\frac{EJ}{N}} = 864\ кг$$

По формуле (65) определяем R_e

$$R_e = \frac{pe}{2} + \frac{Nh}{e} = \frac{40 \cdot I80,5}{2} + \frac{I5000 \cdot 33}{I80,5} = 6350\ кГ.$$

По формуле (67) определяем силу натяжения трубопровода в точке касания со стингером

$$T = R_e \sin\theta + N\cos\theta = 6350 \cdot 0,34I + I5000 \cdot 0,94 =$$

$$= I6260\ кГ.$$

По формуле (68) определяем плавучесть стингера на единицу его длины

$$\delta = \frac{2Q_e L_к}{L^2 \cos^2\theta} + \frac{p L_к^2}{L^2} = \frac{2 \cdot 864 \cdot 79}{II0^2 \cdot 0,94^2} + \frac{40 \cdot 79^2}{II0^2} = 33,4\ кГ/м.$$

$$L_к = \frac{(H-h)}{\sin\theta} = \frac{60-33}{0,34I} = 79\ м.$$

ЛИТЕРАТУРА

I. Герштейн М. С., Левин С. И. Учет влияния гидростатического давления на выбор сечения подводного трубопровода. "Строительство трубопроводов" 1972, №11.

2. Указания по проектированию гидротехнических сооружений, подверженных волновым воздействиям. СН 288-64, М., Стройиздат, 1965.

3. Сб. "Нефть и море". II и III гл. М., изд-во "Недра", 1968.

4. Pipeline and Gas J. 1972, 199, №3.

5. Подводно-технические, водолазные и судоподъемные работы. Экспресс-информация. ВИНИТИ №47, 1971.

6. Pipeline Eng. 1961, 41, №7.

7. Pipe Line Ind. 1969, 31, №4.

8. Pipe Line Ind. 1971, 35, №1.

9. "Указания по производству работ при сооружении магистральных стальных трубопроводов". Вып. 9. "Строительство подводных переходов". М., ОНТИ ВНИИСТа, 1971.

10. Искендеров И. А. Вопросы проектирования и строительства морских трубопроводов. Баку, Азербайджанское Государственное издательство, 1970.

11. Левин С. И. Проектирование и строительство подводных трубопроводов. М., Гостоптехиздат, 1960.

12. "Инженер-нефтяник". М., изд-во "Недра" № 4, стр. 53-56, 1970.

13. Подводно-технические, водолазные и судоподъемные работы. Экспресс-информация. №46, ВИНИТИ, 1971.

14. Сб. Трубопроводный транспорт. (Дискуссионный симпозиум). М., 1971, ДС, 25. УП Мировой нефтяной конгресс.

15. Ратнер А. Г., Гольдин З. Р. Конструкции трубозаглубительных снарядов и способы их работы при строительстве подводных трубопроводов (Тематический научно-технический обзор) М., ВНИЭГазпром. 1971.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 3

I. Общие положения 6

2. Основные требования к инженерным изысканиям при строительстве морских трубопроводов I2

3. Классификация и выбор способа укладки морских трубопроводов 24

4. Укладка трубопровода способом протаскивания по дну 30

5. Укладка трубопровода способом свободного погружения с предварительной буксировкой плетей 42

6. Укладка трубопровода с трубоукладочной баржи последовательным наращиванием 56

Приложения 65

Литература I06

Р Е К О М Е Н Д А Ц И И

ПО ТЕХНОЛОГИИ ПРОКЛАДКИ МОРСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

Р I25-72

Издание ОНТИ ВНИИСТа

Редактор Разумовская Т.Я. Корректор Меликова Г.Ф.
Технический редактор Беремева Т.В.

Л-49371 Подписано в печать 23.4.1973 г. Формат 60х84/16
Печ.л. 7,25 Уч.-изд.л. 5,5 Бум.л.3,6
Тираж 500 экз. Цена 33 коп. Заказ 60

Ротапринт ВНИИСТа

gost.e-ecolog.ru