МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА ПРЕДПРИЯТИЙ
НЕФТЯНОЙ И ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ
ВНИИСТ

РУКОВОДСТВО

ПО МЕТОДАМ РАСЧЕТА ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ ПОГРУЖЕНИИ НА БОЛЬШИЕ ГЛУБИНЫ

Р 294-77

Москва 1978

gost.e-ecolog.ru

УДК 621.643.002.2.001.2(204.1) (083.96)

В Руководстве изложены методы расчета напряженно-деформированного состояния подводных трубопроводов в процессе их укладки на большие глубины при строительстве на внутренних водоемах и морских акваториях, приведены программы расчета на ЭВМ и дана методика оценки прочности и устойчивости стенки трубопровода в процессе укладки.

Руководство разработано лабораторией методов расчета и конструирования трубопроводов (ЛМР) совместно с лабораторией строительства подводных трубопроводов (ЛСПТ) на основе обобщения и анализа имеющегося отечественного и зарубежного опыта, а также исследований, проведенных во ВНИИСТе.

Руководство предназначено для организаций, занимающихся проектированием и строительством подводных трубопроводов.

Руководство составили: канд.техн.наук М.С.Гершгейн, инж. Б.Н.Крупкин (ВНИИСТ) и инж. В.Я.Канаев (трест СПТС) при участии кандидатов техн.наук И.Д.Красулина, С.И.Левина (ВНИИСТ) и инж. П.Г.Бакаратьяна (трест СПТС).

Все замечания и предложения просьба направлять по адресу: 105058, Москва, Окружной проезд, 19, ВНИИСТ, лаборатория методов расчета и конструирования трубопроводов.

© Всесоюзный научно-исследовательский институт по строительству магистральных трубопроводов (ВНИИСТ), 1978

ВВЕДЕНИЕ

Строительство подводных переходов через глубоководные озера и водохранилища и подводных трубопроводов на морском шельфе связано с использованием новых методов укладки и монтажа, что повышает требования к прочности и устойчивости стенок подводных трубопроводов при их прокладке.

Методы расчета напряженно-деформированного состояния трубопровода, описанные в существующих нормативных документах, применяются в случаях укладки трубопроводов на глубины, не превышающие 20-30 диаметров трубопровода.

При строительстве подводных трубопроводов на больших глубинах упомянутые методы расчета могут оказаться непригодными.

В настоящем Руководстве изложен метод расчета напряженно-деформированного состояния подводных трубопроводов при укладке на большие глубины (ориентировочно более 20-30 диаметров), приведены программы расчета на ЭВМ перемещений и напряжений в трубопроводе, даны формулы для проверки прочности и устойчивости стенок трубопровода при укладке. Допустимо применение изложенного метода при укладке трубопроводов погружением и на меньшую глубину.

Изложенные в Руководстве методы расчета основаны на теоретических исследованиях, результаты которых сравнивались с данными модельных экспериментов и литературными данными. Руководство по методам расчета на прочность подводных трубопроводов при погружении на большие глубины разработано впервые и будет развито и уточнено по результатам опытного внедрения.

Приведенные в Руководстве программы предназначены для расчета напряженно-деформированного состояния трубопровода, укладываемого способом погружения с поверхности воды смонтированной плети трубопровода. Однако разработанный метод расчета является достаточно универсальным и его применение легко может быть распространено и на различные технологические схемы строительства и ремонта подводных трубопроводов с учетом как статических, так и динамических эффектов.

Всесоюзный научно-исследовательский институт по строительству магистральных трубопроводов (ВНИИСТ)	Руководство по методам расчета подводных трубопроводов при погружении на большие глубины	Р 294-77

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.I. Настоящее Руководство разработано в развитие главы СНиП П-45-75 "Нормы проектирования. Магистральные трубопроводы","Рекомендаций по технологии прокладки морских трубопроводов" Р 125-72, "Руководства по конструкциям и методам расчета трубопроводов в мельфовых зонах морей" Р 216-76. Оно может быть использовано при проектировании и строительстве нефте-, газо- и продуктопроводов, сооружаемых на внутренних водоемах и морских акваториях.

I.2. Руководство содержит методы расчета трубопроводов на нагрузки и воздействия, возникающие при строительно-монтажных работах, которые следует применять при составлении проектов организации строительства, используя при этом "Рекомендации по технологии прокладки морских трубопроводов" Р 125-72, нормативные документы ВНИИСТа по технологии укладки подводных трубопроводов методом свободного погружения с приложением растягивающих усилий и другие нормативные и рекомендательные документы Миннефтегазстроя, относящиеся к технологии строительства подводных трубопроводов.

В разделе 2 настоящего Руководства перечислены типичные способы укладки подводных трубопроводов, которые получили наибольшее распространение в мировой практике строительства.

Изложенные ниже методы расчета подводных трубопроводов относятся к укладке методом погружения (исключая способ протаскивания). Оборудование, необходимое для осуществления укладки тем или иным способом, указывается в проекте организации строительства подводного трубопровода.

Внесено лабораторией методов расчета и конструирования трубопроводов	Утверждено ВНИИСТом 1 октября 1977 г.	Разработано впервые

I.3. Нагрузки и воздействия на трубопровод при укладке и их сочетания, которые следует учитывать в расчете, перечислены в разделе 3 настоящего Руководства. При определении величин нагрузок и воздействий используют материалы инженерных изысканий, состав и объем которых определяют согласно Рекомендациям Р 125-72 и Руководству Р 216-76.

I.4. Изложенный в разделе 4 настоящего Руководства метод расчета напряженно-деформированного состояния трубопровода при укладке относится к случаям действия на трубопровод нагрузок в вертикальной плоскости.

При необходимости учета напряжений и деформаций трубопровода от действия течений рекомендуется применять методику, изложенную в книге С.И.Левина "Подводные трубопроводы". М.,"Недра", 1970.

Метод расчета трубопровода, учитывающий волновые воздействия при укладке и динамическую нагрузку при качке трубоукладочной барки,в настоящее время отсутствует.

Применение приведенного здесь метода расчета допустимо при волнении до I балла (на основе существующего опыта).

I.5. В прил. I, 2, 3 даны программы ГЕК-I, ГЕК-2 и ГЕМ на алгоритмическом языке Фортран, предназначенные для расчета напряженно-деформированного состояния трубопровода при укладке.

Программа ГЕК-I позволяет рассчитать напряжения, возникающие при укладке подводных трубопроводов на большие глубины,и перемещения его при погружении заливом без продольных усилий; программа ГЕК-2 - напряжения и перемещения при погружении заливом с приложением продольных растягивающих усилий; по программе ГЕМ производятся вычисления динамических напряжений и перемещений трубопровода в процессе опуска конца плети.

Зависимости максимальных продольных напряжений в трубопроводе от глубины укладки при различных усилиях натяжения, полученные в результате расчета по программам ГЕК-I и ГЕК-2, приведены в прил.4.

2. СПОСОБЫ УКЛАДКИ ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

2.1. При строительстве подводных трубопроводов, сооружаемых в различных условиях, применяют следующие основные способы укладки:

протаскивание трубопровода по дну или по предварительно разработанной траншее;

укладка трубопровода с трубоукладочных барж различной конструкции;

свободное погружение с поверхности воды смонтированной плети трубопровода.

2.2. Способ укладки подводных трубопроводов определяется следующими факторами:

гидроморфологическими, топографическими и климатическими условиями в районе строительства трубопровода (длиной перехода, глубиной водоема, водным и ледовым режимом, рельефом дна и берегового участка и т.д.);

назначением и конструкцией подводного трубопровода (видом транспортируемого продукта, диаметром и толщиной стенки труб, маркой стали, типом и массой изоляционного и утяжеляющего покрытия);

условиями судоходства в районе строительства;

наличием специального оборудования для укладки трубопровода (тяговые и плавучие средства, спусковые устройства, понтоны и т.д.).

В некоторых случаях способ укладки подводных трубопроводов может определять его конструкцию (диаметр, толщину стенки, тип и конструкцию балластировки). Это относится, в частности, к укладке трубопровода на большие глубины.

2.3. Протаскивание применяют для укладки трубопровода заданной (проектной) длины или при ограниченных размерах береговой монтажной площадки для укладки отдельных плетей со сваркой стыков на берегу около уреза воды.

Способ укладки трубопровода протаскиванием по дну практически не зависит от глубины водной преграды. Применение этого способа ограничивается для труб малого диаметра (до 500 мм) их прочностью на разрыв, а для труб большого диаметра – мощностью тяговых средств, а также сопротивлением трубопровода боковому смещению под воздействием течений.

При разработке технологии протаскивания трубопровода по дну необходимо определить:

массу трубопровода без пригрузки и с пригрузкой;

отрицательную плавучесть трубопровода с пригрузкой и закрепленными разгружающими понтонами;

необходимую величину тяговых усилий на различных этапах протаскивания;

напряжения в трубопроводе в процессе протаскивания;

допустимые радиусы изгиба трубопровода.

2.4. Укладка трубопровода с трубоукладочной баржи в зависимости от ее конструкции, метода монтажа и спуска трубопровода может выполняться следующими способами:

последовательным наращиванием с монтажом и сваркой отдельных труб в нитку на монтажной эстакаде баржи и спуском трубопровода в воду с помощью специального устройства - стингера;

вертикальным погружением трубопровода на дно водоема;

сматыванием трубопровода с барабана, установленного на барже.

2.5. 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 с контролем и изоляцией стыков;

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

На рис.1 дана схема укладки трубопровода с баржи, оборудованной спусковым и натяжным устройствами.

2.6. С целью уменьшения напряжений в трубопроводе в процессе укладки, и, следовательно, увеличения допустимой глубины погружения, баржа оборудована специальным спусковым устройством - стингером, поддерживающим трубопровод на верхнем участке, и натяжными устройствами для создания в трубопроводе растягивающего усилия, которое уменьшает его кривизну на нижнем провисающем участке.

2.7. Метод вертикального погружения с баржи (рис.2) заключается в том, что трубопровод наращивают и погружают в воду в вертикальном положении. После стыковки и сварки очередной трубы с погруженной плетью баржу перемещают по трассе буксиром. Одновременно с перемещением трубопровод опускают на дно. Такой метод укладки позволяет исключить изгиб трубопровода на верхнем участке плети. Натяжение трубопровода в процессе его укладки является необходимым условием, обеспечивающим надежную работу всей трубоукладочной системы.

2.8. Для укладки трубопроводов небольшого диаметра (до 600 мм) применяют специальные баржи, оснащенные барабаном для намотки труб. Перед укладочными операциями на береговой монтажной площадке производят сварку, изоляцию и намотку трубопровода на накопительный барабан. В процессе укладки трубопровода баржу перемещают вдоль трассы, плеть разматывают с барабана, трубопровод выпрямляют на специальном устройстве и

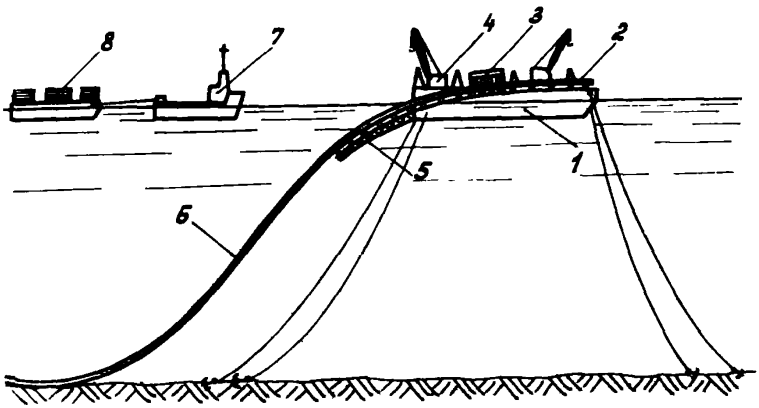

Рис.I. Схема укладки трубопровода с баржи, оборудованной спусковым и натяжным устройствами:

I - трубоукладочная баржа; 2 - трубопровод на сварочно-монтажной линии; 3 - натяжной механизм; 4 - кран; 5 - стингер; 6 - провисающий участок трубопровода; 7 - буксир; 8 - грузовая баржа с трубами

опускают в воду. Трубоукладочные баржи с барабаном также оборудованы устройством для натяжения трубопровода в процессе укладки.

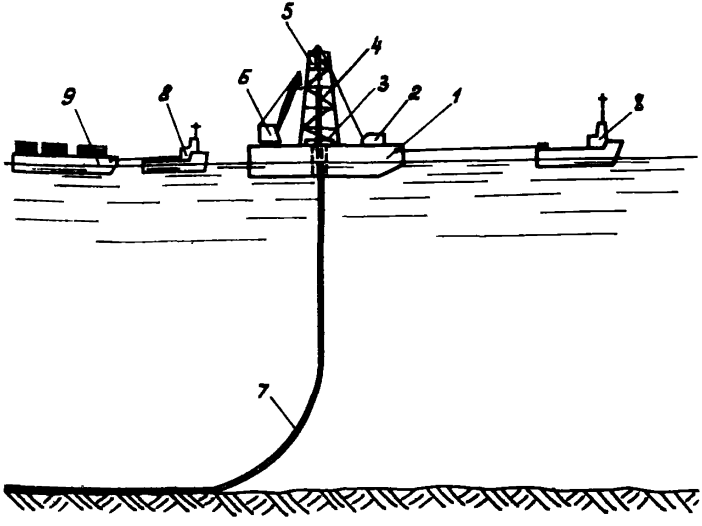

Рис.2. Схема укладки трубопровода с баржи методом вертикального погружения:

I – трубоукладочная баржа; 2 – лебедка; 3 – суппорт; 4 – наращиваемое звено трубопровода; 5 – монтажная вышка; 6 – кран; 7 – погружаемый участок трубопровода; 8 – буксир; 9 – транспортная баржа с трубами

На рис.3 дана схема укладки трубопровода сматыванием с барабана, установленного на барже.

2.9. Способ укладки свободным погружением с поверхности воды предварительно смонтированного трубопровода включает в себя: заготовку на береговой монтажной площадке плети трубопровода, транспортировку ее на плаву в створ укладки, стыковку прибуксированной плети с ранее уложенной (при строительстве

подводных трубопроводов большой протяженности) и собственно укладку трубопровода на дно.

Укладка трубопровода может выполняться путем заполнения его водой; последовательным открепением понтонов, удерживающих трубопровод на поверхности водоема или заполнением понтонов водой. Возможны различные сочетания указанных методов.

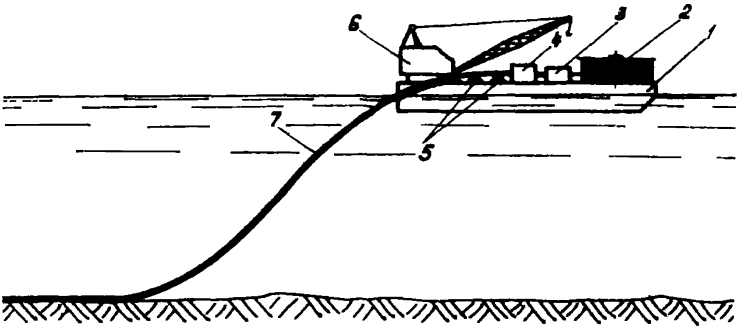

Рис.3. Схема укладки трубопровода сматыванием с барабана, установленного на барже:

I - трубоукладочная баржа; 2 - барабан с навитым трубопроводом; 3 - выпрямляющее устройство; 4 - натяжное устройство; 5 - роликовые опоры; 6 - кран; 7 - погружаемый участок трубопровода

На рис.4 приведена схема укладки трубопровода способом свободного погружения с заполнением водой.

При погружении трубопроводов на небольшие глубины применяют обычные понтоны постоянной грузоподъемности. При значительных глубинах укладки (40 м и более) для уменьшения изгибных напряжений применяют понтоны переменной грузоподъемности и натяжение трубопровода в процессе укладки.

На рис.5 приведена схема укладки подводного трубопровода свободным погружением с буксировкой и стыковкой плетей.

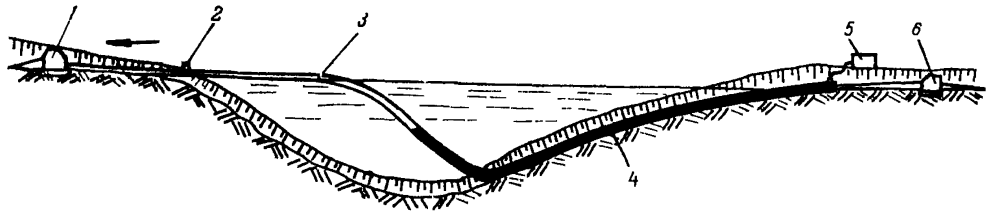

Рис.4. Схема укладки трубопровода способом погружения с заполнением водой:
1 - лебедка для натяжения; 2 - патрубок для выпуска воздуха; 3 - участок трубопровода, заполненный воздухом; 4 - участок трубопровода, залитый водой; 5 - насосная установка; 6 - анкерная лебедка

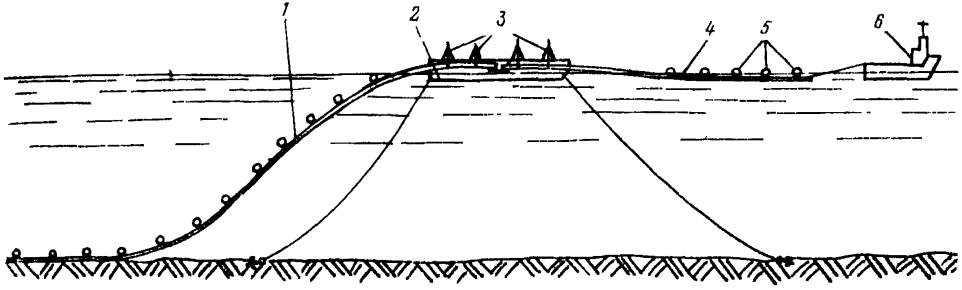

Рис.5. Схема укладки трубопровода свободным погружением с буксировкой и стыковкой плетей:
1 - поднятый участок уложенной плети трубопровода; 2 - судно для стыковки плетей; 3 - кран-балки; 4-наращиваемая плеть трубопровода; 5-понтоны; 6-буксир

3. НАГРУЗКИ И ВОЗДЕЙСТВИЯ

3.I. Нагрузки и воздействия на подводный трубопровод в процессе его монтажа следует принимать согласно главам СНиП П-6-74 "Нормы проектирования. Нагрузки и воздействия", СНиП П-57-75 "Нормы проектирования. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)", СНиП П-45-75 "Нормы проектирования. Магистральные трубопроводы", Рекомендациям Р I25-72, Руководству Р 2I6-76 и с учетом требований настоящего Руководства.

3.2. Расчетные нагрузки определяются как произведение нормативной нагрузки на коэффициент перегрузки n, учитывающий возможное отклонение нагрузок в неблагоприятную сторону.

В процессе укладки на трубопровод действуют одновременно несколько нагрузок. Расчет следует выполнять с учетом наиболее неблагоприятных сочетаний нагрузок. При учете сочетаний, устанавливаемых исходя из физически реальных вариантов одновременного действия различных нагрузок к их величинам (или к вызываемым ими внутренним усилиям), вводят в виде множителя коэффициент сочетаний n_c.

3.3. Нагрузки, действующие на подводный трубопровод при укладке с поверхности, подразделяют согласно главе СНиП П-6-74 на постоянные и временные (длительные, кратковременные и особые).

К постоянным нагрузкам относятся:

нагрузки, обусловленные массой трубопровода, изоляционных покрытий, балласта, устройств и оборудования, установленного на трубе на весь период эксплуатации (коэффициент перегрузки n = I,I);

гидростатическое давление и выталкивающая сила водной среды, в которую укладывают трубопровод (коэффициент перегрузки n = I,0);

силы реакции деформированного грунтового основания под трубопроводом (коэффициент перегрузки n = I,0); временные длительные нагрузки при укладке трубопровода отсутствуют.

К кратковременным нагрузкам относятся:

нагрузки, обусловленные массой жидкости, заполняющей трубопровод при укладке свободным погружением с заливом;

нагрузки от натяжных и других монтажных устройств (понтоны, пригрузы и т.п.) , коэффициент перегрузки равен I,0;

нагрузки, вызванные волнением водной поверхности;

нагрузки от подводных течений;

гидродинамическое сопротивление воды при движении трубопровода в процессе погружения.

К особым нагрузкам, могущим возникнуть при укладке трубопровода, относятся нагрузки, вызванные резким нарушением технологического процесса, временной неисправностью или поломкой оборудования.

3.4. В зависимости от состава нагрузок, учитываемых в расчете, различают:

основные сочетания нагрузок, состоящие из постоянных и временных нагрузок;

особые сочетания нагрузок, состоящие из постоянных, временных и одной из особых нагрузок.

При расчете трубопровода на основные сочетания лишь с кратковременными нагрузками от монтажных устройств (включая и массу заполняющей жидкости) величины этих нагрузок следует учитывать без снижения, а при расчете на основные сочетания, включающие также нагрузки от волнения или от подводных течений (или обе эти нагрузки одновременно), расчетные величины этих нагрузок (или соответствующих им усилий) следует умножить на коэффициент сочетаний $n_C = 0,9$.

При расчете трубопровода на особые сочетания расчетные величины нагрузок от волнения и течений (или соответствующих усилий) следует умножить на коэффициент сочетаний $n_C = 0,8$.

Особую нагрузку следует принимать без снижения.

3.5. Собственную массу трубопровода, отнесенную к единице длины (кг/см), определяют расчетом по среднему диаметру трубы и номинальной толщине стенки при плотности стали $\gamma_{ст} = 0,00785$ кг/см^3.

При расчете укладки трубопровода с бетонным покрытием необходимо пользоваться уточненными значениями массы бетонного покрытия и площади поперечного сечения трубопровода с покрытием в соответствии с указаниями, изложенными в разделе I Рекомендаций Р 125-72.

3.6 Выталкивающую силу воды $q_{в}$(кгс/см), которая приходится на единицу длины полностью погруженного участка трубопровода и действует по нормали к изогнутой оси трубопровода, следует определять по формуле

$$q_{в} = \gamma_{в} g A (\cos\alpha - wK), \qquad (1)$$

где $\gamma_{в}$ – плотность воды, которая должна быть установлена с учетом количества растворенных в воде солей, кг/см³;

g = 981 см/с² – ускорение силы тяжести;

A – полная площадь поперечного сечения трубопровода по наружному диаметру с учетом изоляции, обетонирования и т.п., см²;

w – глубина погружения рассматриваемого элемента трубопровода (от свободной поверхности воды до оси трубы), см;

α – угол наклона касательной к изогнутой оси трубопровода по отношению к горизонтали, рад ;

K – кривизна изогнутой оси трубопровода(считается положительной при расположении центра кривизны ниже оси), 1/см.

Для участка трубопровода, частично погруженного в воду при пересечении трубопроводом свободной поверхности, выталкивающую силу следует рассчитывать умножением величины, найденной по формуле (1), на коэффициент $K_{п}$, значения которого даны на графике рис.6 в зависимости от отношения глубины погружения w к наружному диаметру D.

3.7 Силу реакции деформируемого грунтового основания на дне $q_{гр}$ (кгс/см), действующую на единицу длины трубопровода, определяют по формуле

$$q_{гр} = \frac{E_{0} B^{2}}{2,3 D}, \qquad (2)$$

где E_{0} – модуль деформации линейно-деформируемого грунтового основания, кгс/см²;

B – ширина (хорда) сегмента трубопровода, погруженного в грунт,см.

Модуль деформации E_{0} грунта определяют по данным инженерно-геологических изысканий с учетом указаний главы СНиП II-16-76 "Нормы проектирования. Основания гидротехнических сооружений".

При отсутствии данных изысканий значения модуля деформации грунтов следует принимать по табл.I СНиП II-I6-76 , где: для скальных грунтов $E_0 >$ 50000 кгс/см^2, для полускальных грунтов E_0 = I0000-50000 кгс/см^2, для крупнообломочных грунтов E_0 = 50-I000 кгс/см^2, для глинистых грунтов E_0 = 30-I000 кгс/см^2.

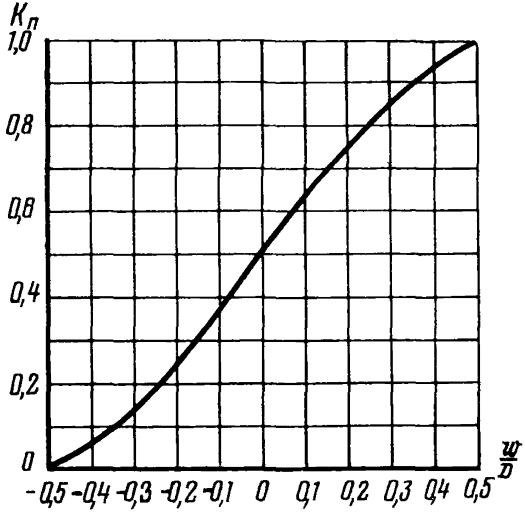

Рис.6. Зависимость коэффициента $K_п$ от относительной глубины погружения трубопровода

3.8. Сила гидродинамического сопротивления воды в вертикальной плоскости при движении трубопровода в процессе укладки принимается действующей по нормали к изогнутой оси в направлении, противоположном направлению движения, и равной

$$q_{гд} = (1/2) C_x \rho_в D v^2 + (\pi D^2/4) C_н a, \quad (3)$$

где ϑ^{ϱ} – нормальная составляющая скорости движения трубопровода, см/с;

a – нормальная составляющая ускорения, см/с^2;

C_X – коэффициент лобового сопротивления;

C_M – коэффициент присоединенной массы.

3.9. Волновые нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения приведены в главе СНиП П-57-75 и во "Временных технических указаниях по расчету устойчивости морских подводных трубопроводов при воздействии волн и течений" ВТУ-65-мПТ, Гипроморнефть, Баку, 1965.

Нагрузки, вызванные волнением водной поверхности и качкой трубоукладочного судна, обусловленной этим волнением, допускается не учитывать в расчете при волнении до I балла.

3.10. Силу лобового сопротивления X и подъемную силу У на единицу длины трубопровода, обусловленные действием течения, определяют по формулам:

$$X = (1/2)\, C_X \rho_B \vartheta_T^2 D; \qquad (4)$$

$$У = (1/2)\, C_У \rho_B \vartheta_T^2 D, \qquad (5)$$

где C_X – коэффициент лобового сопротивления;

$C_У$ – коэффициент подъемной силы;

ϑ_T – скорость набегающего потока.

В расчете необходимо учитывать направление набегающего на трубопровод потока по отношению к укладываемому трубопроводу.

При определении нагрузок от подводных течений направление и скорость течения определяют по данным инженерно-гидрологических изысканий.

Значения коэффициента лобового сопротивления C_X для трубопроводов с различными типами поверхности, покрытыми изоляционными пленками, бетонным покрытием, футеровочными деревянными рейками, меняются в зависимости от числа Рейнольдса в диапазоне от I,2 до 0,4.

Коэффициент подъемной силы C_y зависит от относительного расстояния до дна и от числа Фруда и изменяется в диапазоне от 0 до I. Величины C_x и C_y для конкретных случаев можно найти в обзоре С.И.Левина и Д.В.Штеренлихта "Вопросы проектирования и строительства подводных трубопроводов, сооружаемых в сложных условиях" , М., изд. ВНИИОЭНГ, 1969.

4. МЕТОДИКА РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДА ПРИ УКЛАДКЕ

4.I. В настоящем разделе приведены основные положения методики, алгоритмы расчета и описания программ для ЭВМ, с помощью которых вычисляют продольные усилия, изгибающие моменты в вертикальной плоскости и форму упругой оси при укладке подводных трубопроводов.

4.2. В качестве расчетной модели трубопровода принят тонкий гибкий нерастяжимый стержень с конечной жесткостью на изгиб. Используется система координат, связанная с изогнутой осью трубопровода (рис.7). Положение каждой точки на оси определяется координатой s , отсчитываемой от верхнего конца укладываемой плети вдоль соответствующей кривой, форму которой в каждый момент имеет упругая ось трубопровода. Кроме того, каждой точке упругой оси соответствует угол α , составляемый касательной к оси трубопровода с горизонталью.

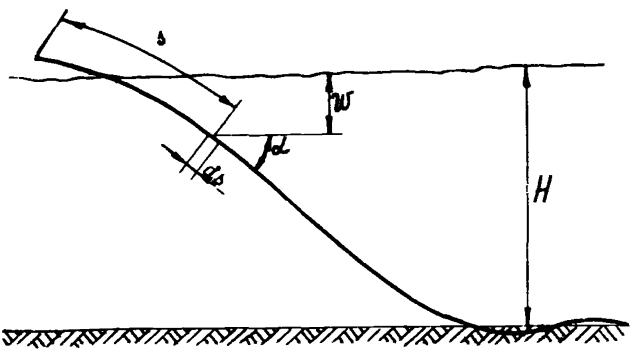

Рис.7. Геометрическая схема трубопровода

В расчетном алгоритме учтены изменения плавучести трубопровода на верхнем участке при пересечении свободной поверхности воды, продольные растягивающие усилия, реакция деформируемого дна водоема.

4.3. В программе ГЕМ, составленной для расчета перемещений и напряжений в трубопроводе при опуске конца плети с поверхности, используется метод, основанный на численном моделировании нестационарного процесса опуска.

В программах ГЕК-I и ГЕК-2, составленных для расчета статических перемещений и напряжений в подводном трубопроводе при укладке погружением по S -образной кривой без растягивающих усилий (ГЕК-I) и с приложением продольных растягивающих усилий (ГЕК-2), использован вариант метода установления. Метод основан на численном решении тех же уравнений движения, что применены в программе ГЕМ, но при иных начальных условиях.

4.4. Изгиб трубопровода в вертикальной плоскости при укладке описывается следующим уравнением движения в проекциях на нормаль к изогнутой оси:

$$EJ\frac{\partial^4\alpha}{\partial s^4}-\frac{\partial}{\partial s}\left[(1+\beta)mg\cos\alpha\right]-T_{пр}\frac{\partial^2\alpha}{\partial s^2}+\frac{\partial q_в}{\partial s}+$$

$$+\frac{\partial r_{гр}}{\partial s}+\frac{\partial q_{гд}}{\partial s}+(1+\beta)m\frac{\partial^2\alpha}{\partial t^2}=0, \qquad (6)$$

где EJ – изгибная жесткость трубопровода, кгс·см^2;

m – масса трубопровода на единицу длины, кгс·с^2/см^2;

β – относительная величина дополнительной массы (пригрузки) на единицу длины на отдельных участках погружаемого трубопровода;

$T_{пр}$ – продольное растягивающее усилие в трубопроводе, зависящее от координаты s, кгс;

$q_в$ – выталкивающая сила на единицу длины трубопровода, кгс/см;

$r_{гр}$ – реакция деформируемого грунтового основания на единицу длины для участков трубопровода, лежащих на дне, кгс/см;

$q_{гд}$ – распределенная по длине сила гидродинамического сопротивления, кгс/см;

t – время, с.

Уравнение в проекциях на касательную к оси трубопровода, служащее для вычисления распределения растягивающего продольного усилия $T_{пр}$ по длине трубопровода, имеет вид

$$\frac{\partial T_{пр}}{\partial s} + (1+\beta) m g \sin\alpha - (1+\beta) \tau_{гр} f_{тр} \cos\alpha = 0, \qquad (7)$$

где $f_{тр}$ – коэффициент трения трубопровода о грунт.

В случаях приложения к трубопроводу сосредоточенных сил от понтонов, тросов и т.п. в уравнения (6) и (7) вводятся члены, соответствующие проекциям этих усилий на нормаль и на касательную к изогнутой оси.

4.5. Уравнения (6), (7) решаются при тех или иных граничных условиях в зависимости от технологической схемы укладки.

На верхнем конце трубопровода (при $s = 0$) задаются значения угла α_0 и кривизны $\left(\frac{\partial\alpha}{\partial s}\right)_0$. Например, в случае укладки с прямолинейного стингера угол $\alpha_0 = \psi$, где ψ – угол наклона стингера к горизонтали; кривизна $\left(\frac{\partial\alpha}{\partial s}\right)_0 = 0$. При укладке трубопровода с криволинейного стингера $\left(\frac{\partial\alpha}{\partial s}\right)_0 = 1/R$, где R – радиус кривизны стингера (см.рис.1). При укладке способом погружения с поверхности воды по схеме рис.4 задаются значениями $\alpha_0 = 0$; $\left(\frac{\partial\alpha}{\partial s}\right)_0 = 0$.

Граничные условия на нижнем конце рассчитываемой плети трубопровода принимаются различными при расчете S -образной (или J -образной) кривой и при расчете процесса опуска конца плети.

При расчете S -образной (или J -образной) кривой на нижнем конце задаются значения $\alpha_L = 0$; $\left(\frac{\partial\alpha}{\partial s}\right)_L = \theta$, где θ – угол наклона дна к горизонтали.

При расчете процесса опуска конца плети задаются значения:

$$\left(\frac{\partial\alpha}{\partial s}\right)_L = 0; \qquad \left(\frac{\partial^2\alpha}{\partial s^2}\right)_L = 0.$$

После касания концом плети дна граничные условия принимают вид:

$$\left(\frac{\partial\alpha_L}{\partial s}\right)_L = 0; \quad \left(\frac{\partial^3\alpha}{\partial s^3}\right)_L = -\frac{\tau_{гр}}{EJ}.$$

Начальные условия для углов α и скоростей плети во всех случаях принимаются нулевыми.

4.6. Система нелинейных уравнений, описывающих движение трубопровода, приведена к безразмерному виду.

Уравнение (6) представлено в форме

$$\frac{\partial^4 \alpha}{\partial \zeta^4} + b \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \tau^2} + \varepsilon \frac{\partial \alpha}{\partial \tau} = F(\alpha, q, c, p, T), \qquad (8)$$

где $\zeta = \frac{\delta_{разм}}{L}$ – безразмерная продольная координата;

$\tau = \frac{t}{L^2}\sqrt{\frac{EJ}{m}}$ – безразмерный параметр времени;

$q = \frac{q_в L^3}{EJ}$ – безразмерный параметр выталкивающей силы;

$p = \frac{mg L^3}{EJ}$ – безразмерная масса трубопровода на единицу длины;

$c = \frac{z_{гр} L^3}{EJ}$ – безразмерная реакция грунтового основания;

$T = \frac{T_{пр} L^2}{EJ}$ – безразмерное продольное усилие;

ε – коэффициент "искусственной вязкости", который вводится при расчете методом установления.

L – длина плети трубопровода, см.

4.7. Численное решение уравнения (6) осуществляется с помощью неявной схемы метода конечных разностей. Ось рассчитываемой плети трубопровода разбивается по длине на K участков длиной $\Delta\zeta = 1/K$ каждый (рис.8). Шаг по времени обозначается через $\Delta\tau$.

Для расчета по неявной конечно-разностной схеме используется шаблон узлов, показанный на рис.9. Индекс i соответствует номеру точки по длине трубопровода, индекс j – номеру слоя по времени.

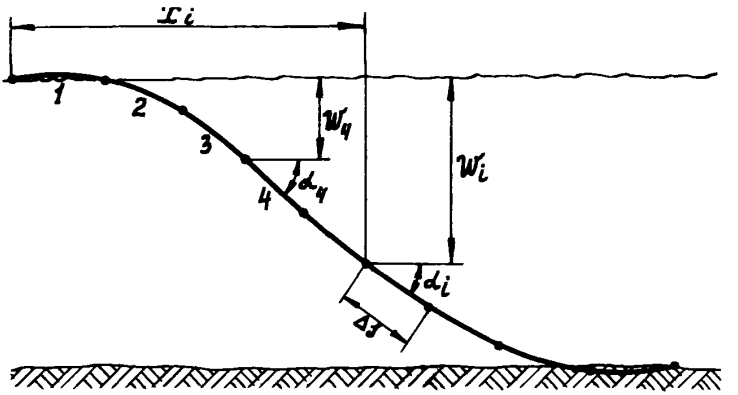

Рис.8. Схема разбивки трубопровода на элементы (1,2,3,4 – номера участков трубопровода)

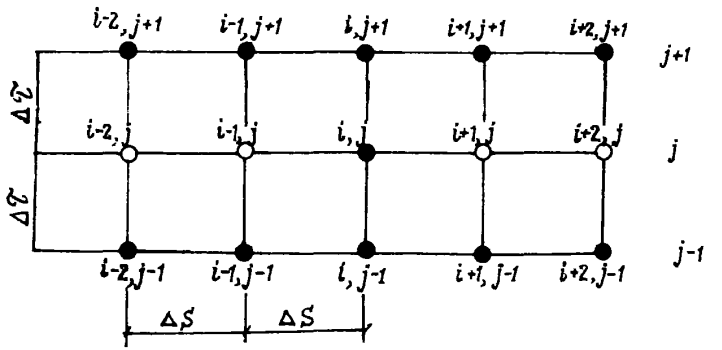

Рис.9. Шаблон узлов конечно-разностной схемы

Используются центральные конечно-разностные операторы. Конечно-разностная аппроксимация уравнения (8) в узле i, j имеет вид:

$$h_1 \hat{L}(\alpha_i^{j+1}) + h_2 \hat{L}(\alpha_i^{j-1}) + \hat{T}(\alpha_i^{j+1}, \alpha_i^{j}, \alpha_i^{j-1}) -$$

$$= \hat{F}(\alpha_i, q_i, T_i, \dots), \qquad (9)$$

где $h_1, h_2 = 1 - h_1$ – параметры разностной схемы (весовые коэффициенты);

$\hat{L}$ – конечно-разностный аналог производной $\frac{\partial^4 \alpha}{\partial \delta^4}$;

$\hat{F}$ – конечно-разностный аналог функции F в уравнении (8);

$\hat{T}$ – конечно-разностный аналог производных по времени в уравнении (8).

С помощью конечно-разностных аппроксимаций вида (9) составляется матричное уравнение для каждого слоя j разностной сетки. Из соотношения (9) вытекает следующее выражение для i -й строки в матричном уравнении j -го слоя по времени:

$$B_{i,1}\alpha_{i-2}^{j+1} + B_{i,2}\alpha_{i-1}^{j+1} + B_{i,3}\alpha_i^{j+1} + B_{i,4}\alpha_{i+1}^{j+1} +$$

$$+ B_{i,5}\alpha_{i+2}^{j+1} = R_i(\alpha), \qquad (10)$$

где

$$B_{i,5} = B_{i,1} = \frac{h_1}{(\Delta\delta)^4}, \qquad (11)$$

$$B_{i,4} = B_{i,2} = -\frac{4h_1}{(\Delta\delta)^4}; \qquad (12)$$

$$B_{i,3} = \frac{6h_1}{(\Delta\delta)^4} + \frac{\delta}{(\Delta\tau)^2} + \frac{\varepsilon}{\Delta\tau}; \qquad (13)$$

$$R_i = b\,\frac{2\alpha_i^j - \alpha_i^{j-1}}{(\Delta\tau)^2} + \varepsilon\,\frac{\alpha_i^{j-1}}{\Delta\tau} -$$

$$-\frac{1}{(\Delta s)^4}\left(\alpha_{i-2}^{j-1} - 4\alpha_{i-1}^{j-1} + 6\alpha_i^{j-1} - 4\alpha_{i+1}^{j-1} + \alpha_{i+2}^{j-1}\right) +$$

$$+ T_i^j \frac{1}{(\Delta s)^2}\left(\alpha_{i+1}^j - 2\alpha_i^j + \alpha_{i-1}^j\right) -$$

$$- \frac{1}{2\Delta s}\left(q_{i+1} - q_{i-1}\right) +$$

$$+ \frac{p}{2\Delta s}\left(b_{i+1}\cos\alpha_{i+1}^j - b_{i-1}\cos\alpha_{i-1}^j\right) - \frac{1}{2\Delta s}\left(c_{i+1} - c_{i-1}\right). \qquad (14)$$

Составление и решение матричного уравнения вида

$$[B][\alpha^{j+1}] = [R] \qquad (15)$$

для каждой строки по времени представляет собой центральную часть расчетного алгоритма. В результате решения матричного уравнения находят строку значений α_i на j +1-м шаге по времени. Затем составляют новое уравнение для j +2-й строки, проводят вычисления для следующего момента времени и т.д.

4.8. Форму упругой оси трубопровода на каждом шаге по времени определяют, вычисляя координаты узлов по формулам:

$$x_i = i\Delta s \sum_1^i \cos\alpha_i + x_0\,; \qquad (16)$$

$$w_i = i\Delta s \sum_1^i \sin\alpha_i + w_0\,. \qquad (17)$$

Значения x_0 и w_0 принимаются в зависимости от схемы укладки.

4.9. Распределение продольных усилий по длине трубопровода находят по значениям α_i^j и w_i^j с помощью численного интегрирования по формуле, вытекающей из (7):

$$T_{i+1}^{j} = T_{i-1}^{j} + 2\Delta b(-\rho b \sin\alpha_i^j + b\ell_{zp} f \cos\alpha_i^j). \qquad (18)$$

Значение T_0^j на верхнем конце плети принимается равным нулю при отсутствии натяжения и $T_0^j = N_{нат}$ при натяжении усилием $N_{нат}$.

4.10. Расчет напряжений и перемещений подводного трубопровода при укладке свободным погружением с заливом водой без продольного натяжения осуществляется по программе ГЕК-I. В качестве исходных данных задаются значения следующих параметров:

K – число участков, на которое разбита по длине рассматриваемая плеть трубопровода (рекомендуется принимать K = = I00);

$K\delta$ – шаг по длине для выдачи на печать информации о перемещениях и напряжениях в трубопроводе;

$\mathcal{D}$ – безразмерный диаметр трубопровода ($\mathcal{D} = \frac{\mathcal{D}_H}{L}$), где $\mathcal{D}_H$ – наружный диаметр трубопровода с изоляцией, слоем бетона и т.п.; L – длина трубопровода; рекомендуется принимать $L \approx 500\ \mathcal{D}_T$, где $\mathcal{D}_T$ – диаметр стальной трубы);

H – безразмерная (отнесенная к длине трубопровода L) глубина акватории в месте укладки;

β – отношение массы воды $m_ж$, заполняющей трубопровод при заливе (на единицу длины трубопровода), к массе m единицы длины (пустого) трубопровода $\beta = \frac{m_ж}{m}$;

f – коэффициент трения трубопровода о дно (при отсутствии экспериментальных данных допускается принимать равным 0,5);

c – безразмерная реакция грунтового основания;

ρ – безразмерная масса трубопровода (см.п.4.6);

q – безразмерный параметр выталкивающей силы (см. п.4.6);

ε – безразмерный параметр "искусственной вязкости" (рекомендуется принимать ε = I000);

$\varkappa$ – отношение шага по времени к шагу по координате, $\varkappa = \frac{\Delta\zeta}{\Delta\delta}$ принимается равным 0,8.

В соответствии с программой в качестве начального условия принят изгиб трубопровода на длине L по S -обра-

ной кривой, составленной из двух полуволн синусоиды. Соответствующее распределение перемещений w и углов α по длине трубопровода описано формулами:

$$w^{o}_{i+1} = w^{o}_{1} + (w^{o}_{n+1} - w^{o}_{1}) \sin \frac{\pi s_i}{2}; \qquad (19)$$

$$\alpha^{o}_{i} = arc\sin \frac{w^{o}_{i+1} - w^{o}_{i-1}}{\Delta s}. \qquad (20)$$

Другое начальное условие - скорость движения трубопровода равна нулю:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \tau} = 0. \qquad (21)$$

Принято, что плеть на половине длины заполнена водой (или пригружена иным способом). Значение параметра длины ℓ, соответствующего относительной длине участка плети без пригрузки, равно 0,5.

Трубопровод при заданных начальных условиях не находится в равновесии, поэтому дальнейшее интегрирование уравнений движения по алгоритму, описанному в пп.4.4–4.10, приводит к описанию динамических перемещений трубопровода под действием неуравновешенных сил к некоторому равновесному состоянию. Ввиду наличия в уравнениях движения "искусственной вязкости" после достижения этого состояния дальнейшее движение прекращается.

Полученное стационарное состояние трубопровода в виде S-образной кривой является результатом расчета по программе ГЕК-1.

На печать выдаются значения следующих безразмерных параметров: времени; уровня воды, залитой в трубопровод; угла наклона трубопровода в этой точке и скорости его изменения; прикладываемого растягивающего усилия, а также таблица безразмерных значений параметров X_i, w_i, α_i, $\frac{\partial \alpha_i}{\partial s}$ и T_i по длине плети. Значения перемещений и напряжений по длине трубопровода могут быть представлены в виде графиков.

4.II. Вычисления напряжений и перемещений подводного трубопровода, укладываемого методом погружения при действии продольного натяжения, выполняются по программе ГЕК-2.

В качестве подпрограммы используется программа ГЕК-I. Кроме исходных данных, используемых в программе ГЕК-2, для данной программы вводятся следующие исходные данные:

T_{max} максимальное значение безразмерного параметра внешнего усилия, прикладываемого к трубопроводу на верхнем конце;

T_0 – безразмерная скорость возрастания внешнего растягивающего усилия;

$T_п$ – шаг значений внешнего усилия для вывода на печать перемещений и усилий в трубопроводе.

Вначале по подпрограмме ГЕК-I находится стационарное положение трубопровода при укладке погружением без приложения растягивающего усилия. Затем усилие на верхнем конце трубопровода T_1 увеличивается во времени по линейному закону. Вычисление перемещений и напряжений в трубопроводе проводится по тому же алгоритму, который описан в пп.4.4–4.I0, но с учетом изменения граничного условия для T_1. Счет заканчивается при достижении величиной T_1 значения T_{max}.

На печать выдаются значения X_i, ϑ_i, α_i, $\frac{\partial \alpha_i}{\partial S}$ и T_i при значениях T_1, равных $T_п$, $2T_п$, ..., T_{max}.

4.I2. По программе ГЕК вычисляются динамические напряжения и перемещения трубопровода в процессе погружения конца плети под действием залива воды в полость трубопровода.

Исходные данные для вычислений те же, что в программе ГЕК-I, и дополнительно следующие:

v – безразмерная линейная скорость заполнения водой плети трубопровода; $v = v_p t L \sqrt{\frac{m}{EJ}}$, где v_p – соответствующая размерная скорость изменения длины заполненного водой участка трубопровода;

α_{lim} – предельное значение скорости α_v изменения угла наклона трубопровода в сечении, соответствующем поверхности уровня залитой в трубопровод воды; при значении α_v, меньшем или равном α_{lim}, расчет заканчивается;

DELT – шаг изменения длины залитого водой участка трубопровода для вывода информации на печать.

Вычисления по программе ГЕМ производят для процесса опускания трубопровода без приложения растягивающего усилия. В качестве начального условия принято положение трубопровода, которое соответствует заглушенной плети, плавающей на поверхности воды.

Счет начинается с момента начала залива трубопровода водой. Воду заливают с одного конца плети с постоянной заданной скоростью v_p. С помощью алгоритма, описанного в пп.4.4–4.10, вычисляют последовательные положения трубопровода при погружении и соответствующие напряжения. По прохождении точкой, соответствующей концу залитого участка, длин $DELT \cdot n$, где n = 1, 2, ..., и т.д., печатается таблица (или графики) величин, характеризующих форму и напряжения в трубопроводе. После касания плетью дна на соответствующие участки трубопровода действует сила реакции грунтового основания. На каждом шаге вычисляется угол α_v и глубина погружения w_v точки трубопровода, соответствующей уровню залива. Когда плеть трубопровода занимает равновесное положение в виде S-образной кривой, дальнейшее заполнение плети водой приводит к смещению S-образной кривой параллельно самой себе. Уровень воды в трубопроводе относительно поверхности w_v и угол α_v при этом остаются постоянными. Поэтому, когда α_v становится меньше некоторого малого наперед заданного значения α_{lim}, счет по программе заканчивается.

4.13. Значения изгибающих моментов, действующих в вертикальной плоскости (без учета волновых нагрузок), находят по формуле

$$M_B = \frac{EJ}{L} \frac{\partial \alpha}{\partial \bar{s}}, \qquad (22)$$

где значения $\frac{\partial \alpha}{\partial \bar{s}}$ берутся из столбца "изгиб" таблицы результатов счета. Расчетным является максимальное значение M_B. Горизонтальную и вертикальную координаты соответствующего сечения по длине трубопровода находят умножением значений, стоящих в той же строке в столбцах X и w величин, на L

Расчетное значение полного изгибающего момента находят геометрическим суммированием момента M_B с моментом M_Γ от сил, действующих в горизонтальной плоскости:

$$M = \sqrt{M_B^2 + M_\Gamma^2}\,. \qquad (23)$$

Продольные напряжения σ_M в стенках трубопровода от изгиба следует находить делением M на момент сопротивления, вычисленный без учета изоляции, обетонирования и т.п.

Продольные усилия N в стенках трубопровода находят умножением величины T в столбце "растяжение" (в той же строке, где найден максимальный изгибающий момент) на параметр EI/L^2:

$$N = T\,\frac{EI}{L^2}\,. \qquad (24)$$

Продольные напряжения σ_N находят делением N на площадь сечения трубы без изоляции, бетона и т.д.

5. ПРОВЕРКА ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ СТЕНОК ТРУБОПРОВОДА

5.1. Проверку прочности стенок подводного трубопровода при укладке проводят согласно СНиП II-45-75 из условия

$$\sigma_{пр}^{н} \le \frac{C}{K_н}\,R_2^{н}\,, \qquad (25)$$

где $\sigma_{пр}^{н} = \sigma_M + \sigma_N$ – максимальные суммарные продольные напряжения в трубопроводе от нормативных нагрузок и воздействий;

$R_2^{н}$ – минимальное значение предела текучести σ_T материала труб по государственным стандартам и техническим условиям на трубы;

$K_н$ – коэффициент надежности, принимаемый по табл.10 СНиП II-45-75;

C – коэффициент, принимаемый равным 0,85, для трубопроводов I и II категорий и 0,65 для категории В согласно СНиП II-45-75.

5.2. Устойчивость стенок трубопровода при совместном действии сжимающих напряжений от изгиба и внешнего гидростатического давления проверяют по формуле

$$\frac{\sigma_{пр.сж}}{\sigma_{01}} + \frac{\sigma_{кц}}{\sigma_{02}} \leqslant m, \qquad (26)$$

где $\sigma_{пр\ сж}$ – расчетное продольное сжимающее напряжение от изгиба и продольного усилия в укладываемом трубопроводе, кгс/см^2;

$\sigma_{кц} = \frac{pD}{2\delta}$ – расчетное кольцевое сжимающее напряжение от внешнего гидростатического давления p, кгс/см^2;

σ_{01} – принимается равным меньшей из величин $0{,}88R_2$ и $0{,}6E\frac{\delta}{D}$ (δ – толщина стенки трубы, D – диаметр срединной поверхности трубы), R_2 – расчетное сопротивление стали сжатию, равное $\frac{R_2^н}{K_2}$, где K_2 – коэффициент безопасности по материалу, принимаемый по СНиП II-45-75;

σ_{02} – определяют по формуле

$$\sigma_{02} = 0{,}17E\left(\frac{2\delta}{D}\right)^2;$$

m – коэффициент условий работы, принимаемый по СНиП II-45-75.

5.3. Если не выполняется условие устойчивости (26), следует выбрать трубопровод с большей толщиной стенки и повторить весь расчет.

Если не выполняется условие (25), применяют следующее:

увеличивают радиус упругого изгиба трубопровода с помощью приложения растягивающего усилия к трубопроводу, применяя понтоны, используя стингер или иную схему укладки;

применяют трубы из стали с более высокими механическими характеристиками;

увеличивают толщину стенки трубопровода.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРОГРАММА ГЕК-I

расчета перемещений и напряжений в подводном трубопроводе при укладке свободным погружением без приложения продольных растягивающих усилий

Программа составлена на алгоритмическом языке Фортран для ЭВМ БЭСМ-6 (мониторная система "Дубна").

```
      PROGRAM ГЕК1
ОПУСК ТРУБОПРОВОДА С ПОВЕРХНОСТИ НА БОЛЬШИЕ ГЛУБИНЫ
      COMMON /BL1/H1,DS,DT/BL2/D,H,BETA,FTR,CNUL,P,QNUL,EPS
     2 /BL4/XAPPA,V,ALIM,DELT,NVAR
     3 /BL3/AL,W,N,T,X,TIME,DLIN,DAL,AVEL,KS
      DIMENSION AL(250,3),W(250),T(250),DAL(250),X(250)
ВВОД  ИСХОДНЫХ ДАННЫХ
   15 READ 41,NVAR,N,KS,D,H,BETA,FTR,CNUL,P,QNUL,EPS,TMAX,
     * TNUL,TM,DELT,
     2XAPPA,V,ALIM,H1
   41 FORMAT (3(I3,2X)/(8(F8.1X)))
      DS=1./N
      DT=DS*XAPPA
      PRINT 42,NVAR
   42 FORMAT (//16X,80HУКЛАДКА     ТРУБОПРОВОДА     СВОБОДНЫМ
      ПОГРУЖЕНИЕМ     БЕЗ     ПРОДОЛЬНОЙ      СИЛЫ'/16X,
     27HВАРИАНТ,2X,I3)
ПЕЧАТЬ  ИСХОДНЫХ  ДАННЫХ
      PRINT 43,P,QNUL,D,H,BETA,FTR,CNUL,EPS,DS,DT,V,ALIM
   43 FORMAT (/9X,4HP = ,F5.,5X,4HQ = ,F5.,5X,4HD = ,F6.4,5X,
     *4HH =.,
     *F5.3,5X,5HBETA=,F5.3,5X,4HF = ,F4.2,5X,4HC = ,F8.0,5X,
      4HEPS=,F7./
     *24X,5HDS = ,F5.3,5X,5HDT = ,F5.3,5X,4HV = ,F6.4,5X,
     *5HALIM=,F9.6)
      PRINT 44,N,KS,                DELT,XAPPA,H1
   44 FORMAT(9X,4HN = ,I3,7X,5HKS = ,I2,7X,
     *                .5HDELT=,F4.2,4X,6HXAPPA=,F4.2,7X,
     *5HH1 = ,F4.2/)
НАЧАЛЬНЫЕ  УСЛОВИЯ
      TIME=0.
           DT=0.
                DLIN=1.
      W(N+1)=H-0.4*)+(P*(1.+BETA)-QNUL-CNUL*D*0.02)/CNUL
      W(1)=(P/QNUL-0.5)*D
      PI=3.1415926
      S=1.5*DS
      DO 5 I=1,N
      W(I+1)=W(1)+(W(N+1)-W(1))*(SIN(PI*S/2))**2
      AL(I,1)=ASIN((W(I+1)-W(I))/DS)
```

```
      AL(I,2)=AL(I,1)
      S=S+DS
    5 T(I)=0.
      DLIN=0.5
      CALL FORMA
ОЧЕРЕДНОЙ  ШАГ ПО  ВРЕМЕНИ
    6 CALL STEP
      CALL FORMA
      DO 21 I=1,N
      IF(AL(I,3)-1.5) 21,20,20
   20 CALL INFO
      GO TO 14
   21 CONTINUE
      AVEL=(AL(250,3)-AL(250,1))/(2*DT)
      IF (DI.LT.DELT)
     -                    GO TO 7
      CALL INFO
      DI=0.
    7 IF(TIME.LT.3.2)
     -                    GO TO 9
      IF(ABS(AVEL).LE.ALIM)
     -                         GO TO 8
      IF(TIME.LT.0.8)
     -                    GO TO 9
    8 CALL INFO
      GO TO 14
    9 TIME=TIME+DT
      DI=DI+DT
СДВИГ  МАССИВОВ
   10 DO 11 I=1,250
        AL(I,1)=AL(I,2)
   11   AL(I,2)=AL(I,3)
      GO TO 6
   14 IF(NVAR.GT.100)
     -                    GO TO 15
      STOP
      END

      SUBROUTINE  STEP
ОЧЕРЕДНОЙ ШАГ ПО ВРЕМЕНИ
      COMMON /BL2/D,H,BETA,GTR,GNUL,P,QNUL,EPS
     R,GAMMA
     2 /BL4/                 ,KAPPA,V,ALIM,DELT,NVAR
     2/BL3/AL,X,N,T,X,       TIME,DLIN/BL1/H1,DS,DT/
      DIMENSION AL(250,3),N(250),T(250),X(250),B(250,5),
     *R(250,1)

      H2=1.-H1
      M=N-2
              S=2.5*DS
МАТРИЦА  КОЭФФИЦИЕНТОВ  B(I,J)
      DO 200 I=3,M
      IF(S-DLIN) 20,10,10
   10 BE=1.+BETA
                        GO TO 30
```

```
 20 BE=1.
 30 B(I,1)=H1/DS**4
    B(I,5)=B(I,1)
    B(I,2)=0.-4*H1/DS**4
    B(I,4)=B(I,2)
    B(I,3)=6*H1/DS**4+BE/DT**2+EPS/DT
ВЕКТОР-СТОЛБЕЦ ПРАВЫХ ЧАСТЕЙ
    R1=BE*(2*AL(I,2)-AL(I,1))/DT**2
    R2=EPS*AL(I,1)/DT
    R3=H2*(AL(I+2,1)-4*AL(I+1,1)+6*AL(I,1)-4*AL(I-1,1)+
   2 AL(I-2,1))/DS**4
    R41=T(I)*(AL(I+1,2)-2*AL(I,2)+AL(I-1,2))/DS**2
    DQDS=(Q(I+1)-Q(I-1))/(2*DS)
    IF ((S+DS)-DLIN) 90,70,70
 70 BEB=1.+BETA
    IF ((S-DS)-DLIN) 91,80,80
 80 BEA=1.+BETA
                    GO TO 100
 90 BEB=1.
 91 BEA=1.
100 R42 =P*(BEB*COS(AL(I+1,2))-BEA*COS(AL(I-1,2)))/(2*DS)
    R43=(RGR(I+1)-RGR(I-1))/(2.*DS)
    FI=R41-DQDS*R42-R43
    R(I,1)=R1+R2-R3+FI
    S=S+DS
200 CONTINUE
ГРАНИЧНЫЕ  УСЛОВИЯ
    B(1,1)=-1.5/DS
    B(1,2)=2./DS
    B(1,3)=-0.5/DS
    R(1,1)=0.
    B(2,1)=2./DS**2
    B(2,2)=-5./DS**2
    B(2,3)=4./DS**2
    B(2,4)=-1./DS**2
    R(2,1)=0.
    B(N,3)=1./DS
    B(N-1,1)=0.
    B(N-1,2)=-0.5/DS
    B(N-1,3)=2./DS
    B(N-1,4)=-1.5/DS
    R(N-1,1)=0.
    R(N,1)=GAMMA
РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАЗНЕНИЯ ДЛЯ ОДНОГО ШАГА ПО ВРЕМЕНИ
    CALL BLEQ (9,N,5,1,250,R,PIV)
    DO 300 I=1,N
300 AL(I,3)=R(I,1)
    RETURN
    END
```

```
      FUNCTION  Q(K)
ВЫЧИСЛЕНИЕ ВЫТАЛКИВАЮЩЕЙ СИЛЫ
      COMMON /BL2/D,H,BETA,FTR,CNUL,P,QNUL,EPS/BL1/H1,DS,
     *DT/BL3/AL,W
      DIMENSION W(250),AL(250,3)
      COAL=0.5*D*COS(AL(K,2))
      RAZ=W(K)+COAL
      IF(RAZ)5,5,6
    5 Q=0.
              GO TO 7
    6 DVA=W(K)-COAL
    8 Q=QNUL*(COS(AL(K,2))-H(K)*0.5*(AL(K+1,2)-AL(K-1,2))/DS)
      IF (DVA) 10,10,9
   10 Q=Q*(COAL+A(K))/(2*COAL)
    9 RETURN
      END



      FUNCTION RGR(K)
ВЫЧИСЛЕНИЕ РЕАКЦИИ ГРУНТА
      COMMON /BL2/D,H,BETA,FTR,CNUL/BL3/AL(250,3),W(250)
      GL=W(K)+D/2.-SNO(K)
      IF(GL) 40,50,50
   40 RGR=0.
      GO TO 60
   50 IF(GL-D/10.) 51,52,52
   51 RGR=CNUL*GL/3.
      GO TO 60
   52 RGR=.2*CNUL*D/10.+(GL-D/10.)*CNUL
   60 RETURN
      END

      FUNCTION DNO(I)
      COMMON /BL2/D,H,BETA,FTR,CNUL,P,QNUL,EPS,GAMMA
     */BL3/AL(250,3),W(250),N,T(250),X(250)
      DNOF=(X(N+1)-X(I))*TAN(GAMMA)
      RETURN
      END
```

```
      SUBROUTINE FORMA
ПРОДОЛЬНЫЕ СИЛЫ И КОНФИГУРАЦИЯ ТРУБОПРОВОДА
      COMMON      /BL1/H1,DS,DT/BL2/D,H,BE,FTR,CNUL,P,QNUL,
     * EPS
     2/BL3/AL,W,N,T,X,        TIME,DL,DAL,AVEL,KS
      DIMENSION AL(250,3),W(250),T(250),X(250),DAL(250)
      X(1)=0.
                    NOR=N+1
      DO 11 I=2,NOR
      M=N+2-I
      W(M)=W(M+1)-DS*SIN(AL(M,3))
        X(I)=X(I-1)+DS*COS(AL(I-1,3))
   11 CONTINUE
КВАДРАТИЧНАЯ ИНТЕРПОЛЯЦИЯ  AL(LEV) И W(LEV)
      KA=INT(DL/DS)
                          RA=DL-DS*KA
                                          RB=DS+RA
      KA=KA+
      AL(250,3)=AL(KA-1,3)+(AL(KA,3)-AL(KA-1,3))*RB/DS+
     * (AL(KA+1,3)-2*
     2 AL(KA,3)+AL(KA-1,3))*RB*RA/(2*DS**2)
      W(250)=W(KA-1)+(W(KA)-W(KA-1))*RB/DS+(W(KA+1)-2*W(KA)+
     *W(KA-1))*RB
     2 +RA/(2*DS**2)
   13 T(1)=0.
                    T(2)=T(1)
                                    NA=N-1
      DO 15 I=2,NA
      CALL AXTEN(I,GR,TR)
      T(I+1)=T(I-1)-2*DS*(GR+SIGN(TR,T(I)))
   15 CONTINUE
      RETURN
      END

      SUBROUTINE AXTEN(K,GR,TR)
      COMMON /BL3/AL,W,N,T,X,
     *TIME,DLIN,DAL,AVEL,KS/BL2/D,H,BETA,
     2FTR,CNUL,P,QNUL,EPS/BL1/H1,DS,DT
      DIMENSION AL(250,3),W(250),T(250),X(250),DAL(250)
      IF(K.NE.1)
     -                GO TO 21
      DADS=(2*AL(K+1,3)-3*AL(K,3)-AL(K+2,3))/(2*DS)
```

```
      DA2DS=(2*AL(K,3)-5*AL(K+1,3)+4*AL(K+2,3)-
     *AL(K+3,3))/DS**2
      GO TO 23
   21 IF(K.NE.N)
     -               GO TO 22
      DADS=(4*AL(K-1,3)-3*AL(K,3)-AL(K-2,3))/(2*DS)
      DA2DS=(2*AL(K,3)-5*AL(K-1,3)+4*AL(K-2,3)-
     * AL(K-3,3))/DS**2
      GO TO 23
   22 DADS=(AL(K+1,3)-AL(K-1,3))/(2*DS)
      DA2DS=(AL(K+1,3)-2*AL(K,3)+AL(K-1,3))/DS**2
   23 DAL(K)=DADS
      IF (K*DS-DS/2-DLIN) 26,24,24
   24  BE=1.+BETA
                     GO TO 28
   26  BE=1.
   28 P1=DADS*DA2DS
      P2=P*BE*SIN(AL(K,3))
      P3=RNUL*0.5*W(K)*DADS**2
      GR=P1+P2-P3
      IF(W(K)+D/2-DNO(K)) 29,30,30
   29 TR1=0.
               GO TO 31
   30 TR1=FTR
      GR=P1+P2
   31 TR=CNUL*(W(K)+D/2-DNO(K))*TR1*COS(AL(K,3))
      RETURN
      END
      SUBROUTINE INFO
ВЫВОД  РЕЗУЛЬТАТОВ  СЧЕТА  ПО ЭТАПАМ
      COMMON /BL3/AL,W,N,T,X,      TIME,DLIN,DAL,AVEL,KS
      DIMENSION AL(250,3),W(250),T(250),X(250),DAL(250)
      DO 1 I=1,N
      CALL AXTEN(I,GR,TR)
    1 CONTINUE
      PRINT 21,TIME,DLIN,W(250),AL(250,3),AVEL,
   21 FORMAT (/5HTIME=,F8.6,7H   DLIN=,F7.4,7H   WLEV=,F7.4,7H
     *ALEV=,
     2F7.4,7H   VELA=,E12.6)
      PRINT 22
   22 FORMAT (/14X,1HX,20X,1HW,16X,10HРАСТЯЖЕНИЕ,11X,5HИЗГИБ
     2:6X,4HУГОЛ/)
      PRINT 23,(X(I),W(I),T(I),DAL(I),AL(I,3),I=1,N,KS),
     *(I+N)W(I+N)X
   23 FORMAT(05(8X,E13.6))
      RETURN
      END
```

ПРОГРАММА ГЕК-2

расчета перемещений и напряжений в подводном трубопроводе при укладке свободным погружением с приложением продольных растягивающих усилий

Программа составлена на алгоритмическом языке Фортран для ЭВМ БЭСМ-6 (мониторная система "Дубна").

```
      PROGRAM ГЕК 2
C
C ОПУСК ТРУБОПРОВОДА С ПОВЕРХНОСТИ НА БОЛЬШИЕ ГЛУБ
                                    ИНЫ
C
      COMMON PART/BL1/H1,DS,DT/BL2/D,H,BETA,FTR,CN
                                    UL,P,QNUL,EPS
     2 /BL4/TMAX,TNUL,TN,XAPPA,V,ALIM,DELT,NVAR
     3 /BL3/AL,W,N,T,X,TENS,TIME,DLIN,DAL,AVEL,KS
      DIMENSION AL(150,3),W(150),T(150),DAL(150),X
                                    (150)
C
C ВВОД  ИСХОДНЫХ ДАННЫХ
C
   15 READ 41,NVAR,N,KS,D,H,BETA,FTR,CNUL,P,QNUL,E
                                    PS,TMAX,TNUL,TN,DELT,
     2XAPPA,V,ALIM,H1
   41 FORMAT (3(I3,2X)/(8(F8.1X)))
      DS=1./N
      DT=DS*XAPPA
      PRINT 42,NVAR
   42 FORMAT (//16X,80НУКЛАДКА     ТРУБОПРОВОДА
                                    СВОБОДНЫМ     ПОГРУЖЕНИ
     2ЕМ     С     ПРОДОЛЬНОЙ      СИЛОЙ/16X, 7НВАРИА
                                    НТ,2X,I3)
C
C ПЕЧАТЬ  ИСХОДНЫХ  ДАННЫХ
C
      PRINT 43,P,QNUL,D,H,BETA,FTR,CNUL,EPS,DS,DT,
                                    V,ALIM
   43 FORMAT (/9X,4HP = ,F5.,5X,4HQ = ,F5.,5X,4HD
                                    = ,F5.4,5X,4HH = ,
     *F5.3,5X,5HBETA=,F5.3,5X,4HF = ,F4.2,5X,4HC =
                                    ,F8.0,5X,4HEPS=,F7./
     *24X,5HDS = ,F5.3,5X,5HDT = ,F5.3,5X,4HV = ,F
                                    6.4,5X,5HALIM=,F9.6)
      PRINT 44,N,KS,TMAX,TNUL,TN,DELT,XAPPA,H1
   44 FORMAT(9X,4HN = ,I3,7X,5HKS = ,I2,7X,5HTMAX=
                                    ,F6.,4X,5HTNUL=,F5.,
     *4X,5HTN = ,F5.,5X,5HDELT=,F4.2,4X,6HXAPPA=,F
                                    4.2,7X,5HH1 = ,F4.2/)
C
C НАЧАЛЬНЫЕ  УСЛОВИЯ
C
      TIME=0.0PART=1.0I=0.0TENS=0.0TE=0.0DLIN=1.
```

```
      DO 5 I=1,N
      AL(I,1)=0. $AL(I,2)=0.$W(I)=(P/QNUL-0.5)*D
    5 T(I)=0.
      W(N+1)=W(N)
      CALL FORMA
C
C ОЧЕРЕДНОЙ  ШАГ ПО  ВРЕМЕНИ
C
      CALL FORMA
      DO 21 I=1,N
      IF(AL(I,3)-1.5) 21,20,20
   20 CALL INFO
      GO TO 14
   21 CONTINUE
      AVEL=(AL(150,3)-AL(1$0,1))/(2*DT)
      IF (DI.LT.DELT) GO TO 7
      CALL INFO
      DI=0.
    7 IF(DLIN.GT.0.7) GO TO 9
      IF(ABS(AVEL).LE.ALIM) GO TO 8
      DOL=0.5
      IF (DLIN.GE.DOL) GO TO 9
    8 CALL INFO
      PART=2 $ GO TO 10
    9 TIME=TIME+DT
      DI=DI+V*DT $ DLIN=1.-V*TIME
C
C СДВИГ  МАССИВОВ
C
   10 DO 11 I=1,150
        AL(I,1)=AL(I,2)
   11   AL(2,2)=AL(I,3)
      GO TO 6
   12 IF (TE.LT.TN) GO TO 13
      CALL INFO
      TE=0.
      IF (TENS.GE.TMAX) GO TO 14
   13 TENS=TENS+TNUL*DT $ TE=TE+TNUL*DT
      GO TO 10
   14 IF(NVAR.GT.100) GO TO 15
      STOP
      END

      SUBROUTINE  STEP
C
C ОЧЕРЕДНОЙ ШАГ ПО ВРЕМЕНИ
C
      COMMON /BL2/D,H,BETA,FTR,CNUL,P,QNUL,EPS
     $ /BL4/TMAX,TNUL,TN,XAPPA,V,ALIM,DELT,NVAR
     $/BL3/AL,W,N,T,X,TENS,TIME,DLIN/BL1/H1,DS,DT/
                                  /PART
      DIMENSION    AL(150,3),W(150),T(150),X(150),B
                                  (150,5),R(150,1)
      H2=1.-H1
      M=N-2 $ S=2.5*DS
```

```
C
C МАТРИЦА  КОЭФФИЦИЕНТОВ  B(I,J)
C
      DO 200 I=3,M
      IF(S-DLIN) 20,10,10
   10 BE=1.+BETA  $ GO TO 30
   20 BE=1.
   30 B(I,1)=H1/DS**4
      B(I,5)=B(I,1)
      B(I,2)=0.-4*H1/DS**4
      B(I,4)=B(I,2)
      B(I,3)=6*H1/DS**4+BE/DT**2+EPS/DT
C
C ВЕКТОР-СТОЛБЕЦ ПРАВЫХ ЧАСТЕЙ
C
      R1=BE*(2*AL(I,2)-AL(I,1))/DT**2
      R2=EPS*AL(I,1)/DT
      R3=H2*(AL(I+2,1)-4**AL(I+1,1)+6*AL(I,1)-4*AL(
                                    I-1,1)+
     2 AL(I-2,1))/DS**4
      DQDS=(Q(I+1)-Q(I-1))/(2*DS)
      IF ((S+DS)-DLIN) 90,70,70
   70 BEB=1.+BETA
      IF ((S-DS)-DLIN) 91,80,80
   80 BEA=1.+BETA $ GO TO 100
   90 BEB=1.
   91 BEA=1.
  100 R42 =P*(BEB*COS(AL(I+1,2))-BEA*COS(AL(I-1,2)
                                    ))/(2*DS)
      R43=(RGR(I+1)-RGR(I-1))/(2.*DS)
      FI=R41-DQDS*R42-R43
      R(I,1)=R1+R2-R3+FI
      S=S+DS
  200 CONTINUE
C
C ГРАНИЧНЫЕ  УСЛОВИЯ
C
      B(1,1)=1./DS $ B(2,1)=0.-1.5/DS $ B(2,2)=2./
                                    DS $ B(2,3)=0.-0.5/DS
      B(N,1)=B(2,3)
      B(N,2)=B(2,2)
      B(N,3)=B(2,1)
      B(N-1,1)=0.-1./DS**2
      B(N-1,2)=4./DS**2
      B(N-1,3)=0.-5./DS**2
      B(N-1,4)=2./DS**2
      R(1,1)=0. $ R(2,1)=0. $ R(N,1)=0.
      R49=W(N+1)*D/2-H
      IF(R49) 79,89,89
   79 C=0. $ GO TO 99
   89 C=^NUL
      IF(AL(N,3).LE.0.) C=0.
   99 R(N-1,1)=C*R49*2*DS
C
```

```
137 C РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ОДНОГО ШАГА ПО ВРЕ
                                    МЕНИ
138 C
139         CALL BLEQ (B,N,5,1,150,R,PIV)
140         DO 300 I=1,N
141     300 AL(I,3)=R(I,1)
142         RETURN
143         END

144         FUNCTION  Q(K)
145 C
146 C ВЫЧИСЛЕНИЕ ВЫТАЛКИВАЮЩЕЙ СИЛЫ
147 C
148         COMMON /BL2/D,H,BETA,FTR,CNUL,P,QNUL,EPS/BL1
                                    /H1,DS,DT/BL3/AL,W
149         DIMENSION W(150),AL(150,3)
150         COAL=0.5*D*COS(AL(K,2))
151         RAZ=W(K)+COAL
152         IF(RAZ)5,5,6
153       5 Q=0. $ GO TO 9
154       6 DVA=W(K)-COAL
155       8 Q=QNUL*(COS(AL(K,2))-W(K)*0.5*(AL(K+1,2)-AL(
                                    K-1,2))/DS)
156         IF (DVA) 10,10,9
157      10 Q=Q*(COAL+W(K))/(2*COAL)
158       9 RETURN
159         END

160         FUNCTION RGR(K)
161 C
162 C ВЫЧИСЛЕНИЕ РЕАКЦИИ ГРУНТА
163 C
164         COMMON /BL2/D,H,BETA,FTR,CNUL,P,QNUL,EPS/BL1
                                    /H1,DS,DT/BL3/AL,W
165         DIMENSION W(150),AL(150,3)
166         GL=W(K)+D/2.-H
167         IF(GL) 40,50,50
168      40 RGR=0.
169         GO TO 60
170      50 IF(GL-D/10.) 51,52,52
171      51 RGR=CNUL*GL/5.
172         GO TO 60
173      52 RGR=0.2*CNUL*D/10.+(GL-D/10.)*CNUL
174      60 RETURN
175         END
176         SUBROUTINE FORMA
177 C
178 C ПРОДОЛЬНЫЕ СИЛЫ И КОНФИГУРАЦИЯ ТРУБОПРОВОДА
179 C
180         COMMON PART/BL1/H1,DS,DT/BL2/D,H,BE,FTR,CNUL
                                    ,P,QNUL,EPS
181        2/BL3/AL,W,N,T,X,TENS,TIME,DL,DAL,AVEL,KS
182         DIMENSION AL(150,3),W(150),T(150),X(150),DAL
                                    (150)
```

```
183         X(1)=0. ◊ NOR=N+1
184         DO 11 I=2,NOR
185           W(I)=W(I-1)+DS*SIN(AL(I-1,3))
186           X(I)=X(I-1)+DS*COS(AL(I-1,3))
187      11 CONTINUE
188 C
189 C КВАДРАТИЧНАЯ ИНТЕРПОЛЯЦИЯ  AL(LEV) И W(LEV)
190 C
191         KA=INT(DL/DS) ◊ RA=DL-DS*KA ◊ RB=DS-RA
192         KA=KA+1
193         AL(150,3)=AL(KA-1,3)+(AL(KA,3)-AL(KA-1,3))*R
                                      A/DS*(AL(KA+1,3)-2*
194        > AL(KA,3)+AL(KA-1,3))*RB*RA/(2*DS**2)
195         W(150)=W(KA-1)+(W(KA)-W(KA-1))*RB/DS+(W(KA+1
                                      )-2*W(KA)+W(KA-1))*RB
196        > *RA/(2*DS**2)
197      13 T(1)=TENS ◊ T(2)=T(1) ◊ NA=N-1
198         DO 15 I=2,NA
199         CALL AXTEN(I,GR,TR)
200         T(I+1)=T(I-1)-2*DS*(GR+SIGN(TR,T(I)))
201      15 CONTINUE
202         RETURN
203         END
204         SUBROUTINE AXTEN(K,GR,TR)
205         COMMON /BL3/AL,W,N,T,X,TENS,TIME,CLIN,DAL,AV
                                      EL,KS/BL2/D,H,BETA,
206        2FTR,CNUL,P,QNUL,EPS/BLI/H1,DS,DT
207         DIMENSION AL(150,3),W(150),T(150),DAL(150),X
                                      (150)
208         IF(K.NE.1) GO TO 21
209         DADS=(4*AL(K+1,3)-3*AL(K,3)-AL(K+2,3))/(2*DS
                                      )
210         DA2DS=(2*AL(K,3)-5*AL(K+1,3)+4*AL(K+2,3)-AL(
                                      K+3,3))/DS**2
211         GO TO 23
212      21 IF(K.NE.N) GO TO 22
213         DADS=(4*AL(K-1,3)-3*AL(K,3)-AL(K-2,3))/(2*DS
                                      )
214         DA2DS=(2*AL(K,3)-5*AL(K-1,3)+4*AL(K-2,3)-AL(
                                      K-3,3))/DS**2
215         GO TO 23
216      22 DADS=(AL(K+1,3)-AL(K-1,3))/(2*DS)
217         DA2DS=(AL(K+1,3)-2*AL(K,3)+AL(K-1,3))/DS**2
218      23 DAL(K)=DADS
219         IF (K*DS-DS/2-CLIN) 26,24,24
220      24  BE=1.+BETA ◊ GO TO 28
221      26  BE=1.
222      28 P1=DADS*DA2DS
223         P2=P*BE*SIN(AL(K,3))
224         P3=QNUL*0.5*W(K)*DADS**2
225         GR=P1+P2-P3
226         IF (W(K)*D/2-H) 29,30,30
227      29 TR1=0. ◊ GO TO 31
228      30 TR1=FTR
```

```
      GR=P1+P2
   31 TR=CNUL*(W(K)+D/2-H)+TR1*COS(AL(K,3))
      RETURN
      END
      SUBROUTINE INFO
C
C ВЫВОД  РЕЗУЛЬТАТОВ  СЧЕТА  ПО ЭТАПАМ
C
      COMMON /BL3/AL,W,N,T,X,TENS,TIME,DLIN,DAL,AV
                                  EL,KS
      DIMENSION AL(150,3),W(150),T(150),DAL(150),X
                                  (150)
      DO 1 I=1,N
      CALL AXTEN(1,GR,TR)
    1 CONTINUE
      PRINT 21,TIME,DLIN,W(150),AL(150,3),AVEL,TEN
                                  S
   21 FORMAT (/5HTIME=,F8.4,7H  DLIN=,F7.4,7H  WLE
                                  V=,F7.4,7H  ALEV=,
     2F7.4,7H  VELA=,E12.6,7X,7H  TENS=,F7.0)
      PRINT 22
   22 FORMAT (/14X,1HX,20X,1HW,16X,10HРАСТЯЖЕНИЕ,1
                                  1X,5HИЗГИБ/
     2 16X,4HУГОЛ/)
      PRINT 23,(X(I),W(I),T(I),DAL(I),AL(I,3),I=1,
                                  N,KS),X(N+1),W(N+1)
   23 FORMAT(05(8X,E13.6))
      RETURN
      END
```

Приложение 3

ПРОГРАММА ГЕМ

расчета перемещений и напряжений в подводном трубопроводе при опуске конца плети

Программа составлена на алгоритмическом языке Фортран для ЭВМ БЭСМ-6 (мониторная система "Дубна").

```
      PROGRAM ГЕМ
ОПУСК ТРУБОПРОВОДА С ПОВЕРХНОСТИ НА БОЛЬШИЕ ГЛУБИНЫ
      COMMON      /BL1/H1,DS,DT/BL2/D,H,BETA,FTR,CNUL,P,QNUL,
     * EPS
    2 /BL4/          XAPPA,V,ALIN,DELT,NVAR
    3 /BL3/AL,W,N,T,X,TIME,DLIN,DAL,AVEL,KS
      DIMENSION AL(150,3),W(150),T(150),DAL(150),X(150)
ВВОД  ИСХОДНЫХ ДАННЫХ
   15 READ 41,NVAR,N,KS,D,H,BETA,FTR,CNUL,P,QNUL,EPS, DELT,
     2XAPPA,V,ALIN,H1
   41 FORMAT (3(I3,2X)/(8(F8,1X)))
      DS=1./N
      DT=DS*XAPPA
      PRINT 42,NVAR
   42 FORMAT (//16X,[illegible]НЧЕЛАДКА     ТРУБОПРОВОДА     СВОБОДНЫ
     2   ПОГРУЖЕНИЕМ /16X, 7HВАРИАНТ,2X,I3)
ПЕЧАТЬ  ИСХОДНЫХ  ДАННЫХ
      PRINT 43,P,QNUL,D,H,BETA,FTR,CNUL,EPS,DS,DT,V,ALIN
   43 FORMAT (/9X,4HP = ,F5.,5X,4HD = ,F5.,5X,4HD = ,F6.4,5X,
     *4HH = ,
     *F5.3,5X,5HBETA=,F5.3,5X,4HF = ,F4.2,5X,4HC = ,F8.0,5X,
     *4HEPS=,F7./
     *24X,5HDS = ,F5.3,5X,5HDT = ,F5.3,5X,4HV = ,F6.4,5X,
     *5HALIN=,F9.6)
      PRINT 44,N,KS,TMAX,TNUL,TN,DELT,XAPPA,H1
   44 FORMAT(9X,4HN = ,I3,7X,5HKS = ,I2,7X,
     *5HDELT=,F4.2,4X,6HXAPPA=,F4.2,7X,5HH1 = ,F4.2/)
НАЧАЛЬНЫЕ  УСЛОВИЯ
      TIME= .

                        IT=0.

      DO 5 I=1,N                                  DLIN=1.
      AL(I,1)=0.
                        AL(I,2)=0.
    5 T(I)=0.                        V(I)=(P/QNUL-0.5)*D
      D(I+1)=D(I)
```

```
      CALL PCPPZ
     &PPEPENCE  LIT IC  PPEPEMT
    6 CALL STEP
      CALL INCP
      DO 21 I=1,N
      IF(AL(I,3)-1.5) 21,20,20
   20 CALL IMPC
      GO TO 14
   21 CONTINUE
      ALL=(-1(151,3)-AL(150,1))/(2*DT)

     -
      IF (T.LT.TEST)
     -                    GO TO 7
      CALL IMPC
      DT=0.
    7 IF(SLIP.GT.0.) 7
     -                    GO TO 8
      IF(ABS(VEL).LE.ALIP)
     -                         GO TO 8
      WRITE(6,5)
    5 FORMAT(' SLIP')
      GO TO 14
    8 TIME=TIME+DT
      DT=DT*V*DT
                     ELIP=1.-V*TIME
C*****  ACCEPT CB
   10 DO 11 I=1,150
        AL(I,1)=AL(I,2)
   11   AL(I,2)=AL(I,3)
      GO TO 6
   14 IF(NVAR.GT.100)
     -                    GO TO 15
      STOP
      END

C     SUBROUTINE STEP
     &PPEPENCE  LAT DO EPEMENT
     &COMMON /ELZA/ E,BETA,ETF,CNUL,P,GNUL,EPS
     &/ELA/   XAPPA,V,ALIP,DELT,NVAR
     &/ELB/ II,B,A,T,X, DIMENSION  AL(150,3),W(150),T(150),X(150),B(150,5),
     &WP(150,1)
      W2=1.-W1
      NT=2
                  I=3,NVAR
     &WRITE(6,  )(B-TOP  P(I,J)
      DO 2.5 I=3,
      IF(S-'EL') 2,10,12
   10 PS=1.-PS
```

```
                    GO TO 30
 20 BE=1.
 30 B(I,1)=R1/DS**4
    B(I,5)=D(I,1)
    B(I,2)=-4.-4*R1/DS**4
    B(I,4)=D(I,2)
    B(I,3)=6+R1/DS**4+(E/DT**2+ROS/DT
BEK-OF-CTOLBCU MPABLX CACTBA
    R1=BE*(2*AL(I,2)-AL(I,1))/DT**2
    R2=ROS*AL(I,1)/DT
    R3=R2*(AL(I+2,1)-4*AL(I+1,1)+6*AL(I,1)-4*AL(I-1,1)+
   2 AL(I-2,1))/DS**4
    R4=T(I)*(AL(I+1,2)-2*AL(I,2)+AL(I-1,2))/DS**2
    DDDS=(D(I+1)-D(I-1))/(2*DS)
    IF ((S+DS)-DLIN) 60,70,70
 70 BBB=1.+BETA
    IF ((S-(S)-DLIN) 61,80,80
 80 BE=1.+BETA
                    GO TO 100
 90 DEB=1.
 91 BB=1.
100 R42 =BE*(BBB*(DS(AL(I+1,2))-BBA*DDS(AL(I-1,2)))/(2*DS)
    R43=(BGE(I+1)-BOB(I-1))/(2.*DS)
    F1=R41-(BDS*R42-R43
    B(I,1)=R1+R2-R3*F1
    S=S+DS
200 CONTINUE
ГРАНИЧНЫЕ  УСЛОВИЯ
    B(1,1)=1./DS
                    B(2,1)=0.-1.5/DS
                                        B(2,2)=2./DS
    B(2,3)=0.-0.5/DS
    B(N,1)=B(2,3)
    B(N,2)=B(2,2)
    B(N,3)=B(2,1)
    B(N-1,1)=0.-1./DS**2
    B(N-1,2)=4./DS**2
    B(N-1,3)=0.-1./DS**2
    B(N-1,4)=2./DS**2
    B(1,4)=0.
                    B(2,1)=0.
                                        B(N,3)=0.
    R49=(N+1)*DS/2-R
    IF(R.G) 79,80,80
 79 BE=0.
                    GO TO 99
 80 DET(N)
    IF(ABS(B(1,1)).LT.0.)
   -                    GO TO 99
 99 B(1,5)=BE*R49*DS
ПЕРЕНОС ЭЛЕМЕНТОВ ПРАВОЙ ЧАСТИ ОБЩЕГО ВИДА ПО ВРЕМЕНИ
    CALL RLEC (5,N,5,3,150,B,RIV)
    DO 300 I=1,N
300 AL(I,2)=B(I,1)
    DT=DT
    GO
```

```
      FUNCTION PGR(K)
ВЫЧИСЛЕНИЕ РЕАКЦИИ ГРУНТА
      COMMON /BL2/D,H,BETA,FTR,CNUL,P,QNUL,EPS/BL1/H1,DS,
     *DT/BL3/AL,W
      DIMENSION W(150),AL(150,3)
      GL=W(K)+D/2.-H
      IF(GL) 40,50,50
   40 PGR=0.
      GO TO 60
   50 IF(GL-D/10.) 51,52,52
   51 PGR=CNUL*GL/10.
      GO TO 60
   52 PGR=0.2*CNUL*D/10.+(GL-D/10.)*CNUL
   60 RETURN
      END
      FUNCTION  Q(K)
ВЫЧИСЛЕНИЕ ВЕТАЛИКВАЙЛЕЙ СИЛЫ
      COMMON /BL2/D,H,BETA,FTR,CNUL,P,QNUL,EPS/BL1/H1,DS,
     * DT/BL3/AL,W
      DIMENSION W(150),AL(150,3)
      COAL=0.1*D*COS(AL(K,2))
      RAZ=W(K)+COAL
      IF(RAZ)5,5,6
    5 Q=0.
            GO TO 9
    6 DVA=W(K)-COAL
    8 Q=QNUL*(COS(AL(K,2))-W(K)*0.5*(AL(K+1,2)-AL(K-1,2))/DS)
      IF (DVA) 10,10,9
   10 Q=Q*(COAL+W(K))/(2*COAL)
    9 RETURN
      END
      SUBROUTINE FORMA
ПРОДОЛЬНЫЕ СИЛЫ И КОНФИГУРАЦИЯ ТРУБОПРОВОДА
      COMMON PART/BL1/H1,DS,DT/BL2/D,H,BE,FTR,CNUL,P,QNUL,
     *EPS
     2/BL3/AL,W,N,T,X,      TIME,DL,DAL,AVEL,KS
      DIMENSION AL(150,3),W(150),T(150),X(150),DAL(150)
      X(1)=0.
                NOP=N+1
      DO 11 I=2,NOP
        W(I)=W(I-1)+DS*SIN(AL(I-1,3))
        X(I)=X(I-1)+DS*COS(AL(I-1,3))
   11 CONTINUE
КВАДРАТИЧНАЯ ИНТЕРПОЛЯЦИЯ  AL(LEV) И W(LEV)
      KA=INT(DL/DS)
                        RA=DL-DS*KA
                                        RB=DS+RA
      KA=KA-1
      AL(150,3)=AL(KA-1,3)+(AL(KA,3)-AL(KA-1,3))*RB/DS+
     *(AL(KA+1,3)-2*
     2 AL(KA,3)+AL(KA-1,3))*RB*RA/(2*DS**2)
```

```
      W(150)=W(KA-1)+(W(KA)-W(KA-1))*RF/DS+(W(KA+1)-2*W(KA)+
     *W(KA-1))*RR
     2 *RA/(2*DS**2)
  13 T(1)=0.
                    T(2)=T(1)
                                  NA=K-1
      DO 15 I=2,NA
      CALL AXTEN(I,GR,TF)
      T(I+1)=T(I-1)-2*DS*(DR*SIGN(TR,T(I)))
  15 CONTINUE
      RETURN
      END
      SUBROUTINE INPC
C     PERMUTATE  CHET;  DO STAPAN
      COMMON /BLK1/L,K,N,T,X,W,TIME,DLIN,DAL,AVEL,KS
      DIMENSION AL(150,3),X(150),T(150),DAL(150),W(150)
      DO 1 I=1,N
      CALL AXTEN(I,GR,TF)
    1 CONTINUE
      PRINT 21,TIME,DLIN,W(150),AL(150,3)
   21 FORMAT (/5HTIME=,F6.4,7H  DLIN=,F7.4,7H  WLEV=,F7.4,7H
     *ALEV=,
     *F7.4)
      PRINT 22
   22 FORMAT (/14X,1HX,20X,1HW,16X,10HFACTOR*EWAE,11X,5HW3CLE,
     *16X,6HVECTOR/)
      PRINT 23,(X(I),W(I),T(I),DAL(I),(L(I,J),I=1,N,KS),
     *X(K+1),W(N+1)
   23 FORMAT(6(6X,E13.6))
      RETURN
      END
      SUBROUTINE AXTEN(I,GR,TF)
      COMMON /BLK1/L,K,N,T,X,W,TIME,DLIN,DAL,AVEL,
     *KS/BLK2/D,H,BETA,
     2TF,GR/BLK3/AL,BRS/BLK4/I,J,T
      DIMENSION AL(150,3),X(150),T(150),DAL(150),X(150)
      IF(I.EQ.1)
     -                    GO TO 21
      DRS=(4*AL(I,3)-3*AL(I,3)-AL(I-2,3))/(2*DS)
      DRRS=(AL(I,3)-2*AL(I-1,3)+AL(I-2,3))/DS**2
     *-AL(K+3,3))/DS**2
      GO TO 22
   21 IF(I.EQ.2)
     -                    GO TO 22
      DRS=(4*AL(I-1,3)-3*AL(I,3)-AL(I-2,3))/(2*DS)
```

```
      DA2DS=(2*AL(K,3)-5*AL(K-1,3)+4*AL(K-2,3)-
     *AL(K-3,3))/DS**2
      GO TO 23
   22 DADS=(AL(K+1,3)-AL(K-1,3))/(2*DS)
      DA2DS=(AL(K+1,3)-2*AL(K,3)+AL(K-1,3))/DS**2
   23 DAL(K)=DADS
      IF (K*DS-DS/2-DLIN) 26,24,24
   24  FE=1.+DETA
                        GO TO 28
   26  FE=1.
   28 R1=DADS*DA2DS
      R2=P*FE*SIN(AL(K,3))
      R3=RNUL*0.5*W(K)*DADS**2
      QF=R1+R2-R3
      IF (W(K)+D/2-H) 29,30,30
   29 TR1=0.
                        GO TO 31
   30 TR1=FTR
      QF=R1+R2
   31 TR=CNUL*(W(K)+D/2-H)*TR1*COS(AL(K,3))
      RETURN
      END
```

ПРИМЕР РАСЧЕТА МАКСИМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

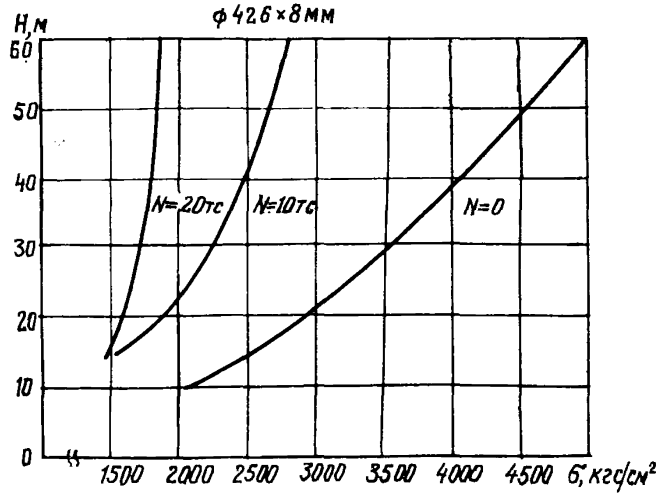

Рис.IO. Зависимость максимальных продольных напряжений в трубопроводе диаметром 426 мм с толщиной стенки 8 мм от глубины укладки при различных усилиях натяжения N

СОДЕРЖАНИЕ

Введение 3

I. Общие положения 4

2. Способы укладки подводных трубопроводов 6

3. Нагрузки и воздействия I2

4. Методика расчета напряженно-деформированного состояния трубопровода при укладке I7

5. Проверка прочности и устойчивости стенок трубопровода 28

Приложения 3I

Руководство

по методам расчета подводных трубопроводов при погружении на большие глубины

Р 294-77

Издание ВНИИСТа

Редактор И.Р.Беляева Корректор С.П.Михайлова
Технический редактор Т.В.Берешева

Л-65332 Подписано в печать II.I.1979г. Формат 60х84/I6
Печ.л. 3,25 Уч.-изд.л. 2,4 Бум.л. I,6
Тираж 600экз. Цена 24 к. Заказ I30

Ротапринт ВНИИСТа

РАБОТАТЬ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНО, БЕЗ ТРАВМ И АВАРИЙ

(из опыта работы бригады Героя Социалистического Труда А.Д.Басова)

1. Не только знать, но и строжайше соблюдать все нормы, правила и инструкции по технике безопасности.

2. Работы проводить в строгом соответствии с проектом организации работ (планом, нарядом-допуском или нарядом-заказом).

3. В обязательном порядке пользоваться всеми предписанными индивидуальными средствами защиты (касками, противогазами, спецобувью, защитными очками, рукавицами и др.).

4. Вести самоконтроль и взаимный контроль всех членов бригады за соблюдением правил техники безопасности.

5. Воспитывать личную и коллективную ответственность за обеспечение работы на производственном участке.

6. Активно участвовать в смотрах, конкурсах и соревнованиях за высокую культуру производства.

7. Опытные рабочие должны следить за работой молодых и вновь поступивших рабочих.

8. Совершенствовать обучение всего обслуживающего персонала.

9. Планировать мероприятия по улучшению условий труда и технике безопасности.

10. Совершенствовать технологические процессы, своевременно заменять устаревшее оборудование.

11. Повышать роль общественного инспектора.

12. Осуществлять 3-ступенчатый метод контроля за безопасностью на производстве.

13. Постоянно проводить профилактическую работу по выявлению нарушений правил техники безопасности.

14. Осуществлять контроль за своевременным выполнением профилактических мероприятий по предупреждению производственного травматизма, аварий и заболеваний.

САМОДИСЦИПЛИНА, САМОКОНТРОЛЬ, БЕЗУСЛОВНОЕ ВЫПОЛНЕНИЕ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ – ВОТ ОСНОВА МЕТОДА РАБОТЫ БЕЗ ТРАВМ И АВАРИЙ.

gost.e-ecolog.ru