

**МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА ПРЕДПРИЯТИЯ  
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**

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 (ДСПТ) 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. Герштейн, инж. Б.Н. Крупкин (ВНИИСТ) и инж. В.Я. Канаев (трест СПГС) при участии кандидатов техн. наук И.Д. Красукина, С.И. Лавина (ВНИИСТ) и инж. П.Г. Башаратяна (трест СПГС).

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

## **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 плиты 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.1. 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 шельфовых 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 организацией 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 проектирования трубопроводов | Утверждено ВНИИСТом<br>1 октября 1977 г. | Разработано впервые |
|---|--|---------------------|

1.3. 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.

1.4. 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 баржи, в настоящее время отсутствует.

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

1.5. В прил. 1, 2, 3 даны программы ГЕК-1, ГЕК-2 и ГЕМ на алгоритмическом языке Фортран, предназначенные для расчета напряженно-деформированного состояния трубопровода при укладке.

Программа ГЕК-1 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 опускания конца плети.

Зависимости максимальных продольных напряжений в трубопроводе от глубины укладки при различных усилиях натяжения, полученные в результате расчета по программам ГЕК-1 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:

гидрометеорологическими, 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 сварной 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 разгрузающими 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. I 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 магмб 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, плетью разматывают с барабана, трубопровод выпрямляют на специальном устройстве и

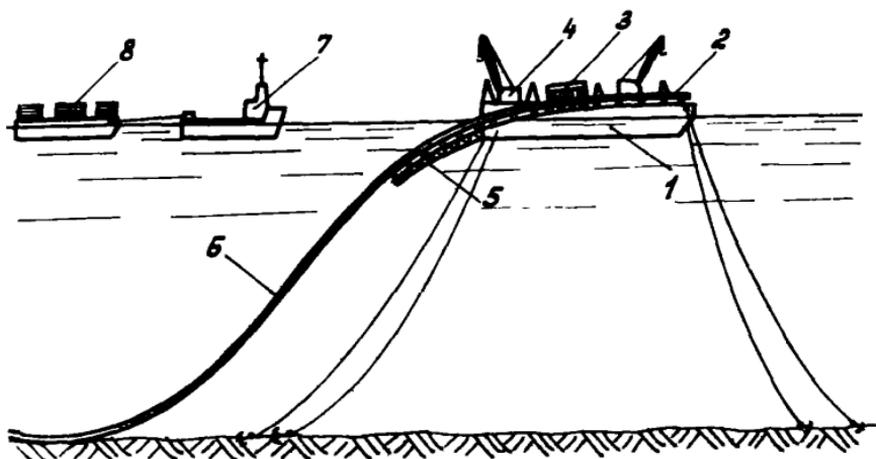


Рис.1. Схема укладки трубопровода с баржи, оборудованной спусковым и натяжным устройствами:

- 1 - трубоукладочная баржа; 2 - трубопровод на сварочно-монтажной линии; 3 - натяжной механизм; 4 - кран; 5 - стнгер;
- 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.

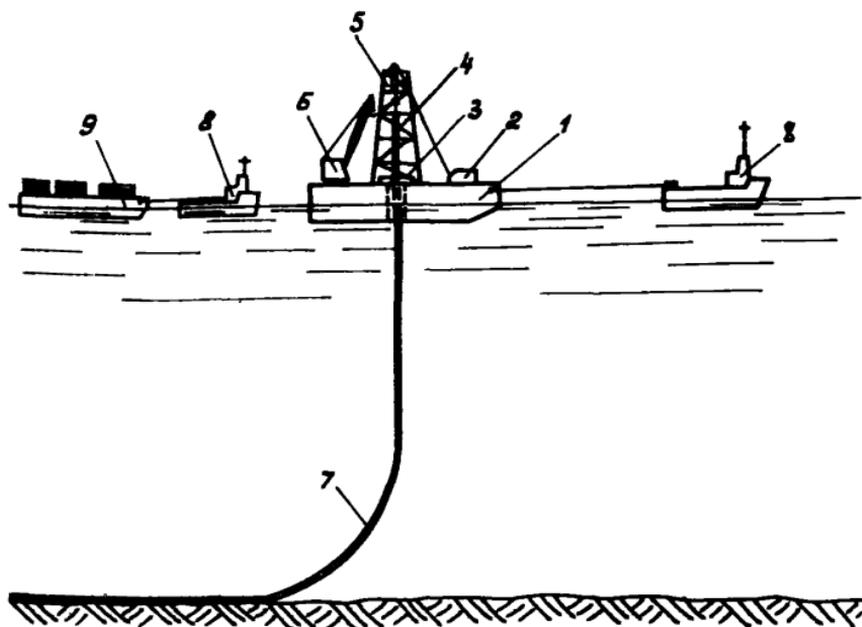


Рис.2. Схема укладки трубопровода с баржи методом вертикального погружения:

1 - 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 откреплением понтонов, удерживающих трубопровод на поверхности водоема или заполнением понтонов водой. Возможны различные сочетания указанных методов.

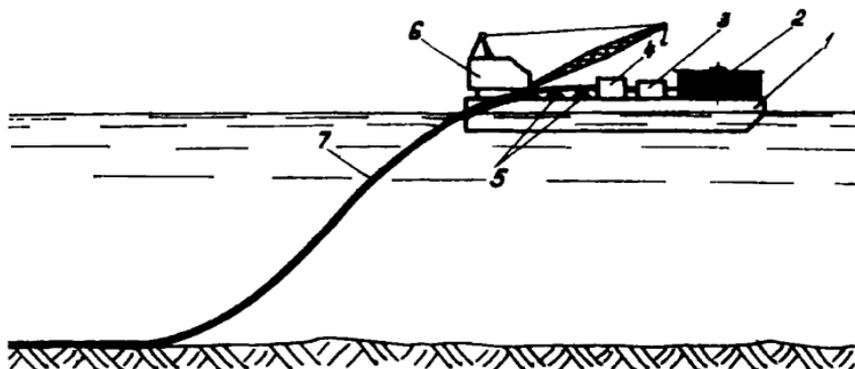


Рис.3. Схема укладки трубопровода смотыванием с барабана, установленного на барже:

1 - 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.

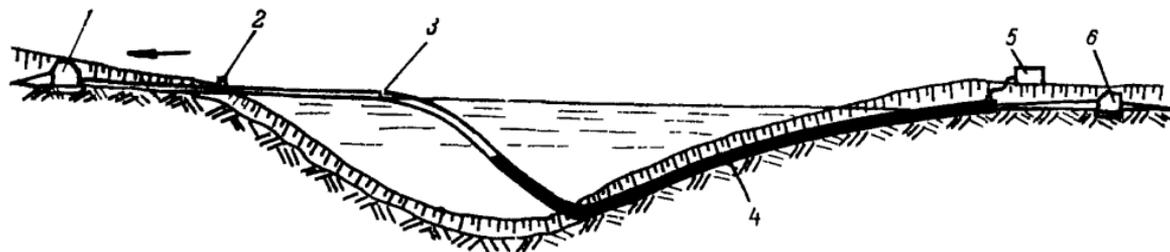


Рис.4. Схема укладки трубопровода способом погружения с заполнением водой:

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

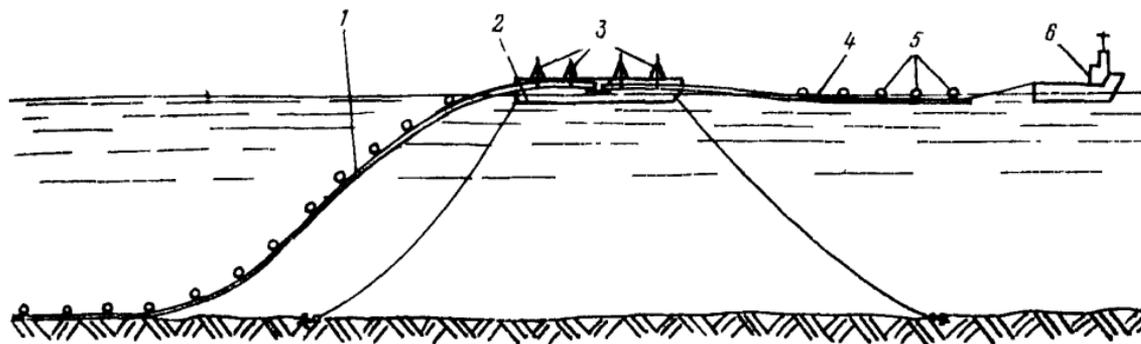


Рис.5. Схема укладки трубопровода свободным погружением с буксировкой и стыковкой плетей:

1 - поднятый участок уложенной плети трубопровода; 2 - судно для стыковки плетей; 3 - край-балки; 4 - наращиваемая плеть трубопровода; 5 - понтоны; 6 - буксир

### 3. НАГРУЗКИ И ВОЗДЕЙСТВИЯ

3.1. 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 125-72, Руководству Р 216-76 и с учетом требований настоящего Руководства.

3.2. Расчетные нагрузки определяются как произведение нормативной нагрузки на коэффициент перегрузки  $\lambda$ , 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  $\lambda_c$ .

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  $\lambda = 1,1$ );

гидростатическое давление и выталкивающая сила водной среды, в которую укладывают трубопровод (коэффициент перегрузки  $\lambda = 1,0$ );

силы реакции деформированного грунтового основания под трубопроводом (коэффициент перегрузки  $\lambda = 1,0$ ); временные длительные нагрузки при укладке трубопровода отсутствуют.

К кратковременным нагрузкам относятся:

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

нагрузки от натяжных и других монтажных устройств (понтон, пригрузы и т.п.), коэффициент перегрузки равен 1,0;

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  $\beta_c = 0,9$ .

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

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

$$\gamma_{ст} = 0,00785 \text{ кг/см}^3.$$

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  $Q_B$  (кгс/см), которая приходится на единицу длины полностью погруженного участка трубопровода и действует по нормали к изогнутой оси трубопровода, следует определять по формуле

$$Q_B = \gamma_B q A (\cos \alpha - \omega K), \quad (1)$$

- где  $\gamma_B$  - плотность воды, которая должна быть установлена с учетом количества растворенных в воде солей, кг/см<sup>3</sup>;
- $q = 981 \text{ см/с}^2$  - ускорение силы тяжести;
- $A$  - полная площадь поперечного сечения трубопровода по наружному диаметру с учетом изоляции, обетонирования и т.п., см<sup>2</sup>;
- $\omega$  - глубина погружения рассматриваемого элемента трубопровода (от свободной поверхности воды до оси трубы), см;
- $\alpha$  - 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  $K_p$ , значения которого даны на графике рис.6 в зависимости от отношения глубины погружения  $\omega$  к наружному диаметру  $D$ .

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

$$z_{гр} = \frac{E_0 B^2}{2,3 D}, \quad (2)$$

- где  $E_0$  - модуль деформации линейно-деформируемого грунтового основания, кгс/см<sup>2</sup>;
- $B$  - ширина (хорда) сегмента трубопровода, погруженного в грунт, см.

Модуль деформации  $E_0$  грунта определяют по данным инженерно-геологических изысканий с учетом указаний главы СНиП П-16-76 "Нормы проектирования. Основания гидротехнических сооружений".

При отсутствии данных искомый значения модуля деформации грунтов следует принимать по табл. I СНиП II-16-76, где: для скальных грунтов  $E_0 > 50000$  кгс/см<sup>2</sup>, для полускальных грунтов  $E_0 = 10000-50000$  кгс/см<sup>2</sup>, для крупнообломочных грунтов  $E_0 = 50-1000$  кгс/см<sup>2</sup>, для глинистых грунтов  $E_0 = 30-1000$  кгс/см<sup>2</sup>.

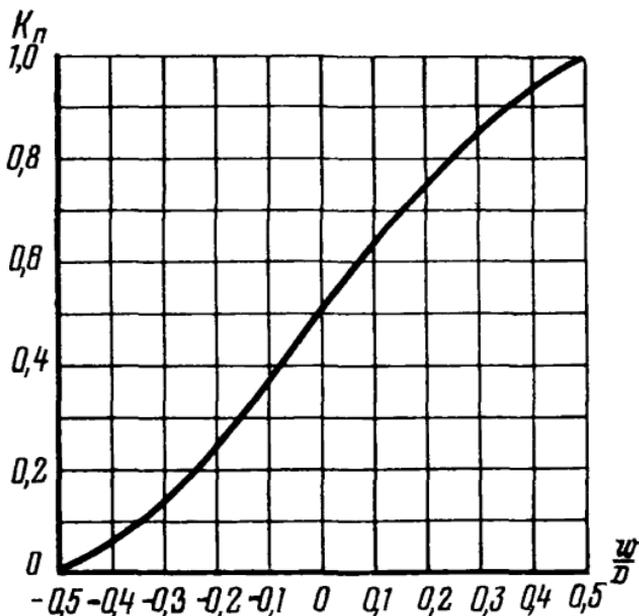


Рис. 6. Зависимость коэффициента  $K_n$  от относительной глубины погружения трубопровода

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

$$q_{гг} = (1/2) C_x \rho_B D v^2 + (\pi D^2/4) C_H Q, \quad (3)$$

где  $v$  - нормальная составляющая скорости движения трубопровода, см/с;  
 $a$  - нормальная составляющая ускорения, см/с<sup>2</sup>;  
 $C_x$  - 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  $Y$  на единицу длины трубопровода, обусловленные действием течения, определяют по формулам:

$$X = (1/2) C_x f_B v_T^2 D; \quad (4)$$

$$Y = (1/2) C_y f_B v_T^2 D, \quad (5)$$

где  $C_x$  - коэффициент лобового сопротивления;  
 $C_y$  - коэффициент подъемной силы;  
 $v_T$  - 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 1,2 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 1. 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. ВНИИЭНГ, 1969.

#### 4. МЕТОДИКА РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДА ПРИ УКЛАДКЕ

4.1. 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  $\alpha$ , составляемый касательной к оси трубопровода с горизонталью.

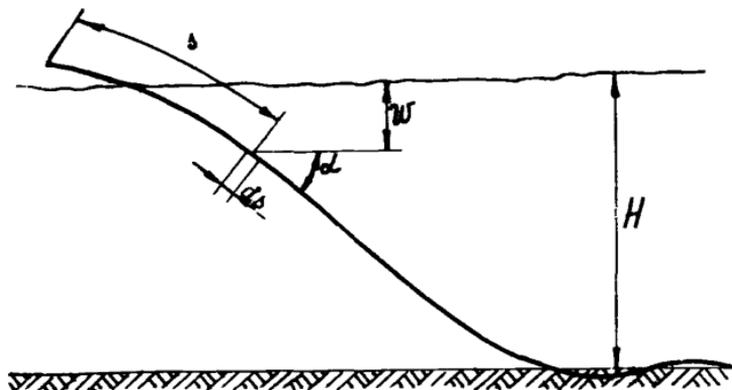


Рис.7. Геометрическая схема трубопровода

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-1 и ГЕК-2, составленных для расчета статических перемещений и напряжений в подводном трубопроводе при укладке погружением по  $S$ -образной кривой без растягивающих усилий (ГЕК-1) 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:

$$EJ \frac{\partial^4 \alpha}{\partial s^4} - \frac{\partial}{\partial s} \left[ (1+\beta) mg \cos \alpha \right] - T_{пр} \frac{\partial^2 \alpha}{\partial s^2} + \frac{\partial Q_B}{\partial s} + \frac{\partial Z_{гр}}{\partial s} + \frac{\partial Q_{гг}}{\partial s} + (1+\beta) m \frac{\partial^2 \alpha}{\partial t^2} = 0, \quad (6)$$

- где  $EJ$  - изгибная жесткость трубопровода, кгс·см<sup>2</sup>;  
 $m$  - масса трубопровода на единицу длины, кгс·с<sup>2</sup>/см<sup>2</sup>;  
 $\beta$  - 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;  
 $Q_B$  - выталкивающая сила на единицу длины трубопровода, кгс/см;  
 $Z_{гр}$  - реакция деформируемого грунтового основания на единицу длины для участков трубопровода, лежащих на дне, кгс/см;  
 $Q_{гг}$  - 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  $T_{TP}$  по длине трубопровода, имеет вид

$$\frac{\partial T_{TP}}{\partial s} + (1+\beta)mg \sin \alpha - (1+\beta)z_{TP} f_{TP} \cos \alpha = 0, \quad (7)$$

где  $f_{TP}$  - 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  $\alpha_0$  и кривизны  $\left(\frac{\partial \alpha}{\partial s}\right)_0$ . Например, в случае укладки с прямолинейного стингера угол  $\alpha_0 = \psi$ , где  $\psi$  - 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 опускания 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  $\theta$  - угол наклона дна к горизонтали.

При расчете процесса опускания конца плети задаются значения:

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

После касания концом плети дна граничные условия принимают вид:

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

Начальные условия для углов  $\alpha$  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

$$\frac{\partial^4 \alpha}{\partial s^4} + \delta \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \tau^2} + \varepsilon \frac{\partial \alpha}{\partial \tau} = F(\alpha, q, c, p, T), \quad (8)$$

- где
- $s = \frac{\delta \text{разм}}{L}$  - безразмерная продольная координата;
  - $\tau = \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}$  - безразмерный параметр времени;
  - $q = \frac{Q_0 L^3}{EJ}$  - 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;
  - $\varepsilon$  - 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  $\Delta s = L/K$  каждый (рис.8). Шаг по времени обозначается через  $\Delta T$ .

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.

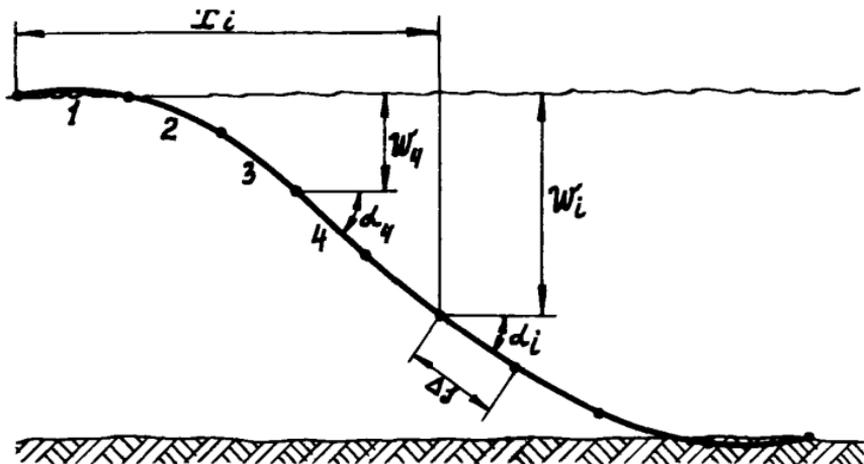


Рис.8. Схема разбиения трубопровода на элементы (1,2,3,4 - номера участков трубопровода)

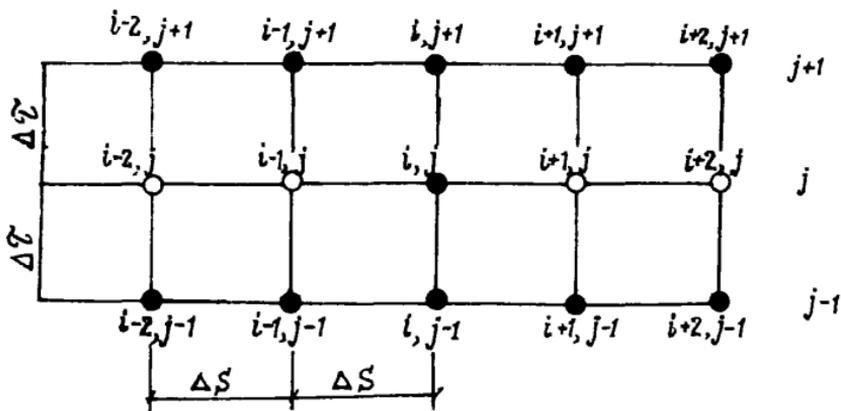


Рис.9. Шаблоны узлов конечно-разностной схемы

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

$$h_1 \hat{L}(\alpha_i^{j+1}) + h_2 \hat{L}(\alpha_i^{j-1}) + \hat{T}(\alpha_i^{j+1}, \alpha_i^j, \alpha_i^{j-1}) - \hat{F}(\alpha_i, q_i, T_i, \dots), \quad (9)$$

где  $h_1, h_2 = \pm h_7$  - параметры разностной схемы (весовые коэффициенты);  
 $\hat{L}$  - конечно-разностный аналог производной  $\frac{\partial^4 \alpha}{\partial S^4}$ ;  
 $\hat{F}$  - 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:

$$B_{i,1} \alpha_{i-2}^{j+1} + B_{i,2} \alpha_{i-1}^{j+1} + B_{i,3} \alpha_i^{j+1} + B_{i,4} \alpha_{i+1}^{j+1} + B_{i,5} \alpha_{i+2}^{j+1} = R_i(\alpha), \quad (10)$$

где  $B_{i,5} = B_{i,1} = \frac{h_1}{(\Delta S)^4}, \quad (11)$

$$B_{i,4} = B_{i,2} = \frac{4h_1}{(\Delta S)^4}; \quad (12)$$

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

$$\begin{aligned}
R_i = & \delta \frac{2\alpha_i^j - \alpha_i^{j-1}}{(\Delta\tau)^2} + \varepsilon \frac{\alpha_i^{j-1}}{\Delta\tau} - \\
& - \frac{1}{(\Delta s)^4} (\alpha_{i-2}^{j-1} - 4\alpha_{i-1}^{j-1} + 6\alpha_i^{j-1} - 4\alpha_{i+1}^{j-1} + \alpha_{i+2}^{j-1}) + \\
& + T_i^j \frac{1}{(\Delta s)^2} (\alpha_{i+1}^j - 2\alpha_i^j + \alpha_{i-1}^j) - \\
& - \frac{1}{2\Delta s} (q_{i+1} - q_{i-1}) + \\
& + \frac{p}{2\Delta s} (\delta_{i+1} \cos \alpha_{i+1}^j - \delta_{i-1} \cos \alpha_{i-1}^j) - \frac{1}{2\Delta s} (c_{i+1} - c_{i-1}). \quad (14)
\end{aligned}$$

Составление и решение матричного уравнения вида

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

для каждой строки по времени представляет собой центральную часть расчетного алгоритма. В результате решения матричного уравнения находят строку значений  $\alpha_i$  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:

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

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

Значения  $x_0$  и  $w_0$  принимаются в зависимости от схемы укладки.

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

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

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-1. В качестве исходных данных задаются значения следующих параметров:

$K$  - число участков, на которое разбита по длине рассматриваемая плеть трубопровода (рекомендуется принимать  $K = 100$ );

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

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

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

$\beta$  - 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);

$\epsilon$  - безразмерная реакция грунтового основания;

$\rho$  - безразмерная масса трубопровода (см. п.4.6);

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

$\epsilon$  - безразмерный параметр "искусственной вязкости" (рекомендуется принимать  $\epsilon = 1000$ );

$\mathcal{X}$  - отношение шага по времени к шагу по координате,

$\mathcal{X} = \frac{\Delta t}{\Delta s}$  принимается равным 0,8.

В соответствии с программой в качестве начального условия принят изгиб трубопровода на длине  $L$  по  $\delta$ -образ-

ной кривой, составленной из двух полуовал синусоиды. Соответствующее распределение перемещений  $W$  и углов  $\alpha$  по длине трубопровода описано формулами:

$$W_{i+1}^0 = W_1^0 + (W_{n+1}^0 - W_1^0) \sin \frac{\pi S_i}{2}; \quad (19)$$

$$\alpha_i^0 = \arcsin \frac{W_{i+1}^0 - W_{i-1}^0}{\Delta S}. \quad (20)$$

Другое начальное условие — скорость движения трубопровода равна нулю:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = 0. \quad (21)$$

Принято, что плетель на половине длины заполнена водой (или пригружена иным способом). Значение параметра длины  $l$ , соответствующего относительной длине участка плетели 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 уравнении 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 выданы 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  $\chi_i$ ,  $W_i$ ,  $\alpha_i$ ,  $\frac{\partial \alpha_i}{\partial S}$  и  $T_i$  по длине плетели. Значения перемещений и напряжений по длине трубопровода могут быть представлены в виде графиков.

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

В качестве подпрограммы используется программа ГЕК-1. 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;

$T_n$  - шаг значений внешнего усилия для вывода на печать перемещений и усилий в трубопроводе.

Вначале по подпрограмме ГЕК-1 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.4.4-4.10, но с учетом изменения граничного условия для  $T_1$ . Счет заканчивается при достижении величиной  $T_1$  значения  $T_{max}$ .

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

4.12. По программе ГЕМ 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-1, 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;

$\alpha_{lim}$  - предельное значение скорости  $\alpha_v$  изменения угла наклона трубопровода в сечении, соответствующем поверхности уровня залитой в трубопровод воды; при значении  $\alpha_v$ , меньшем или равном  $\alpha_{lim}$ , расчет заканчивается;

*DELTA* - 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  $\dot{V}_p$ . 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  $DELTA \cdot n$ , где  $n = 1, 2, \dots$ , 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  $\alpha_{\nu}$  и глубина погружения  $W_{\nu}$  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  $W_{\nu}$  и угол  $\alpha_{\nu}$  при этом остаются постоянными. Поэтому, когда  $\alpha_{\nu}$  становится меньше некоторого малого наперед заданного значения  $\alpha_{lim}$ , счет по программе заканчивается.

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

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

где значения  $\frac{\partial \alpha}{\partial s}$  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  $M_T$  от сил, действующих в горизонтальной плоскости:

$$M = \sqrt{M_B^2 + M_T^2} . \quad (23)$$

Продольные напряжения  $\sigma_M$  в стенках трубопровода от изгиба следует находить делением  $M$  на момент сопротивления, вычисленный без учета изоляции, бетонирования 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  $EI/L^2$ :

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

Продольные напряжения  $\sigma_N$  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 П-45-75 из условия

$$\sigma_{пр}^H \leq \frac{C}{K_H} R_2^H , \quad (25)$$

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

$R_2^H$  - минимальное значение предела текучести  $\sigma_T$  материала труб по государственным стандартам и техническим условиям на трубы;

$K_H$  - коэффициент надежности, принимаемый по табл.10 СНиП П-45-75;

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

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

$$\frac{\sigma_{пр.сж}}{\sigma_{a1}} + \frac{\sigma_{кц}}{\sigma_{a2}} \leq m, \quad (26)$$

где  $\sigma_{пр.сж}$  - расчетное продольное сжимающее напряжение от изгиба и продольного усилия в укладываемом трубопроводе, кгс/см<sup>2</sup>;

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

$\sigma_{a1}$  - принимается равным меньшей из величин  $0,88 R_2$  и  $0,6 E \frac{\delta}{D}$  ( $\delta$  - толщина стенки трубы,  $D$  - диаметр срединной поверхности трубы),  $R_2$  - расчетное сопротивление стали сжатю, равное  $\frac{R_2^H}{K_2}$ , где  $K_2$  - коэффициент безопасности по материалу, принимаемый по СНиП П-45-75;

$\sigma_{a2}$  - определяют по формуле

$$\sigma_{a2} = 0,17E \left( \frac{2\delta}{D} \right)^2;$$

$m$  - коэффициент условий работы, принимаемый по СНиП П-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-1

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 GEK1
ОПУСК ТРУБОПРОВОДА С ПОВЕРХНОСТИ НА БОЛЬШИЕ ГЛУБИНЫ
COMMON /FL1/M1,DS,DT/FL2/D,N,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,N,BETA,FTR,CNUL,P,QNUL,EPS,TMAX,
  * TNUL,TM,DELT,
2 XAPPA,V,ALIM,N1
41 FORMAT (3(I3,2X))/(8(F8,1X))
  DS=1./N
  DT=DS*XAPPA
  PRINT 42,NVAR
42 FORMAT (//16X,80ИЗКЛАДКА ТРУБОПРОВОДА СВОБОДНЫМ
  ПОГРУЖЕНИЕМ БЕЗ ПРОДОЛЬНОЙ СИЛЫ/16X,
37ВВАРИАНТ,2X,I3)
ПЕЧАТЬ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ
PRINT 43,P,QNUL,D,N,BETA,FTR,CNUL,EPS,DS,DT,V,ALIM
43 FORMAT (/9X,4F4.2 = ,F5.3,5X,4H0 = ,F5.3,5X,4F4.2 = ,F6.4,5X,
  * 4HN = ,
  * F5.3,5X,5HBETA = ,F5.3,5X,4HF = ,F4.2,5X,4FC = ,F8.0,5X,
  4HEPS = ,F7./
  * 24X,5+DS = ,F5.3,5X,5HDT = ,F5.3,5X,4HV = ,F6.4,5X,
  * 5HALIM = ,F9.6)
  PRINT 44,N,KS, DELT,XAPPA,N1
44 FORMAT (9X,4HN = ,I3,7X,5HKS = ,I2,7X,
  * . 5HDELT = ,F4.2,4X,6HXAPPA = ,F4.2,7X,
  * 5HN1 = ,F4.2/)
НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ
  TIME=0.
  DI=0.
  DLIN=1.
  W(N+1)=N-D.4+*(P+(1.+BETA)-QNUL-CNUL*D=0.02)/CNUL
  K(1)=(P/QNUL-3.5)*D
  PI=3.1415926
  S=1.5*DS
  DO 5 I=1,N
  W(I+1)=W(I)+(W(N+1)-W(1))*(SIN(PI*S/2))**2
  AL(I,1)=ASIN((W(I+1)-W(1))/DS)

```

```

    AL(I,2)=AL(I,1)
    S=S+DS
5   Y(I)=0.
    DLIN=0.5
    CALL FORMA
ОЧЕРЕДНОМ ШАГ П) 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=3.
7   IF(TIME.LT.0.2)
    -   GO TO 0
    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 ЧАССЫВОВ
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
ОЧЕРЕДНОМ ШАГ П) ВРЕМЕНИ
COMMON /BL2/D,M,BETA,CTR,CNUL,P,QNUL,EPS
R,GAMMA
2 /BL4/
2 /BL3/AL,N,N,T,X, XA,PA,V,ALIM,DELT,NVAR
TIME,DLIN/BL1/M1,DS,DT/
DIMENSION AL(250,3),N(250),T(250),X(250),B(250,5),
NR(250,1)
M2=1,-M1
M=N-2
S=2.5*JS
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)
   F1=R41-DQDS+R42-R43
   R(I,1)=R1+R2-R3+F1
   S=S+DS
200 CONTINUE
ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ
B(I,1)=-1.5/DS
B(I,2)=2./DS
B(I,3)=-0.5/DS
R(I,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)=ЗАМЧА
РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ 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 ВЫТАЛКАВАЮЩЕЙ СИЛЫ
COMMON /BL2/D,H,BETA,CTR,CNUL,P,QNUL,EPS/BL1/H1,DS,
*DT/BL3/AL,W
DIMENSION W(250),AL(250,3)
COAL=0.5*D*GOS(AL(K,2))
RAZ=W(K)+COAL
IF(RAZ)5,5,6
5 Q=0.
GO TO 3
7 PVA=W(K)-COAL
8 Q=CNUL*(COS(AL(K,2))-1(K)*0.5*(AL(K+1,2)-AL(K-1,2))/DS)
IF(PVA) 10,10,9
10 Q=C*(COAL+A(K))/(2*COAL)
9 RETURN
END

```

```

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

```

```

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

```

```

SUBROUTINE FORMA
ПРОДОЛЖЕНИЕ СИЛЫ И КОНФИГУРАЦИЯ ТРУБОПРОВОДА
COMMON /BL1/H1, DS, DT/BL2/D, H, BETA, FTR, CNUL, P, QNUL,
* EPS
/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
  N=N+2-I
  W(N)=W(N+1)-DS*SIN(AL(I, 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*
/ 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 +RB/(2*DS**2)
13 T(1)=0.
      T(2)=T(1)
      NA=1-1
      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(GR, TR)
COMMON /BL1/H1, DS, DT/BL2/D, H, BETA,
* TIME, DLIN, DAL, AVEL, KS/BL3/AL, W, N, T, X,
/BL4/AL(250, 3), W(250), T(250), X(250), DAL(250)
      IF (CNUL)
        GO TO 21
      DS=(DL+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 JAL(K)=DADS
IF (K=DS-DS/2-DLIN) 26,24,24
24 BE=1.+BETA
GO TO 28
26 BE=1.
28 P1=DADS*DADS
P2=P*BE*SIN(AL(K,3))
P3=CNUL*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,1HX,16X,10HPACTBЖЕНИЕ,11X,5HИЗГИБУ
2:6X,4HУГОЛ/)
.PRINT 23,(X(I),W(I),T(I),DAL(I),AL(I,3),I=1,N,KS),
*(I+N)M*(I+N)X
23 FORMAT(05(6X,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").

```

1      PROGRAM GFK 2
2      C
3      C ОПУСК ТРУБОПРОВОДА С ПОВЕРХНОСТИ НА БОЛЬШИЕ ГЛУБИНЫ
4      C
5      COMMON PART/BL1/M1,DS,DT/BL2/D,H,BETA,FTR,CNUL,CN
        UL,P,QNUL,EPS
6      > /BL4/TMAX,TNUL,TN,XAPPA,V,ALIM,DELT,NVAR
7      > /BL3/AL,W,N,T,X,TENS,TIME,DLIN,DAL,AVEL,KS
8      DIMENSION AL(150,3),W(150),T(150),DAL(150),X
        (150)
9      C
10     C ВВОД ИСХОДНЫХ ДАННЫХ
11     C
12     15 READ 41,NVAR,N,KS,D,H,BETA,FTR,CNUL,P,QNUL,E
        PS,TMAX,TNUL,TN,DELT,
13     2XAPPA,V,ALIM,M1
14     41 FORMAT (3(I3,2X))/(8(F8,1X))
15     DS=1./N
16     DT=DS*XAPPA
17     PRINT 42,NVAR
18     42 FORMAT (//16X,ВОЗДУШНАЯ УКАДКА ТРУБОПРОВОДА
        СВОБОДНЫМ ПОГРУЖЕНИИ
19     2EM C ПРОДОЛЬНОЕ СИЛОЕ/16X, УНВАРИА
        НТ,2X,13)
20     C
21     C ПЕЧАТЬ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ
22     C
23     PRINT 43,P,QNUL,D,H,BETA,FTR,CNUL,EPS,DS,DT,
        V,ALIM
24     43 FORMAT (/9X,4HP = ,F5,15X,4HQ = ,F5,15X,4HD
        = ,F5,4,5X,4HN = ,
25     *F5,3,5X,5HBETA=,F5,3,5X,4HF = ,F4,2,5X,4HC =
        ,F8,0,5X,4HEPS=,F7,1
26     *24X,5HDS = ,F5,3,5X,5HDT = ,F5,3,5X,4HV = ,F
        6,4,5X,5HALIM=,F9,6)
27     PRINT 44,N,KS,TMAX,TNUL,TN,DELT,XAPPA,M1
28     44 FORMAT(9X,4HN = ,I3,7X,5HKS = ,I2,7X,5HTMAX=
        ,F6,14X,5HTNUL=,F5,1
29     *4X,5HTN = ,F5,15X,5HDELT=,F4,2,4X,6HXAPPA=,F
        4,2,7X,5HM1 = ,F4,2/)
30     C
31     C НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ
32     C
33     TIME=0.0PART=100I=0.0TENS=0.0TE=0.0DLIN=1.

```

```

34      DO 5 I=1,N
35      AL(I,1)=0. 0AL(I,2)=0.0W(I)=(P/QMUL-0.5)*D
36      5 T(I)=0.
37      W(N+1)=W(N)
38      CALL FORMA
39
40 C ОЧЕРЕДНОЕ ШАГ ПО ВРЕМЕНИ
41 C
42      CALL FORMA
43      DO 21 I=1,M
44      IF(AL(I,3)-1.5) 21,20,20
45      20 CALL INFO
46      GO TO 14
47      21 CONTINUE
48      AVEL=(AL(150,3)-AL(150,1))/(2*DT)
49      IF (DI,LT,DELT) GO TO 7
50      CALL INFO
51      DI=0.
52      7 IF(DLIN.GT.0.7) GO TO 9
53      IF(ABS(AVEL),LE,ALIM) GO TO 8
54      DOL=0.5
55
56      IF (DLIN.GE.DOL) GO TO 9
57      8 CALL INFO
58      PART=2 0 GO TO 10
59      9 TIME=TIME+DT
60      DI=DI+V*DT 0 DLIN=1.-V*TIME
61 C
62 C ГАБИТ МАССИВОВ
63 C
64      10 DO 11 I=1,150
65      AL(I,1)=AL(I,2)
66      11 AL(2,2)=AL(I,3)
67      GO TO 6
68      12 IF (TE,LT,TN) GO TO 13
69      CALL INFO
70      TE=0.
71      IF (TENS.GE,TMAX) GO TO 14
72      13 TENS=TENS+TNUL*DT 0 TETE+TNUL*DT
73      GO TO 10
74      14 IF(NVAR.GT.100) GO TO 15
75      STOP
76      END
77
78 SUBROUTINE STEP
79 C
80 C ОЧЕРЕДНОЕ ШАГ ПО ВРЕМЕНИ
81 C
82      COMMON /BL2/D,H,BETA,FTR,CNUL,P,QMUL,EPS
83      2 /AL,TMAX,TNUL,TN,XAPPA,V,ALIM,DELT,NVAR
84      3 /BL3/AL,W,N,T,X,TENS,TIME,DLIN/BL1/H1,DS,DT/
85      /PART
86      DIMENSION AL(150,3),W(150),T(150),X(150),B
87      (150,5),R(150,1)
88
89      42=1.-H1
90      M=N-2 0 S=2.5*DS

```

```

86 C
87 C МАТРИЦА КОЭФФИЦИЕНТОВ R(I,J)
88 C
89      DO 200 I=3,M
90      IF(S-DLIN) 20,10,10
91      10 BE=1,+BETA 0 GO TO 20
92      20 BE=1.
93      30 B(I,1)=H1/DS**4
94      B(I,5)=B(I,1)
95      B(I,2)=0.-4*H1/DS**4
96      B(I,4)=5(I,2)
97      B(I,3)=6*H1/DS**4+BE/DT**2+EPS/DT
98 C
99 C ВЕКТОР-СТОЛБЕЦ ПРАВЫХ ЧАСТЕЙ
100 C
101      R1=BE*(2+AL(I,2)-AL(I,1))/DT**2
102      R2=EPS*AL(I,1)/DT
103      R3=H2*(AL(I+2,1)-4*AL(I+1,1)+6*AL(I,1)-4*AL(
104          I-1,1)+
105          2 AL(I-2,1))/DS**4
106      DQDS=(Q(I+1)-Q(I-1))/(2*DS)
107      IF ((S+DS)-DLIN) 90,70,70
108      70 BEB=1.+BETA
109      IF ((S-DS)-DLIN) 91,80,80
110      80 BEA=1.+BETA 0 GO TO 100
111      90 BEB=1.
112      91 BEA=1.
113      100 R42 =P*(BEB*COS(AL(I+1,2))-BEA*COS(AL(I-1,2)
114          ))/(2*DS)
115      R43=(RGR(I+1)-RGR(I-1))/(2.*DS)
116      FI=R41-DQDS+R42-R43
117      R(I,1)=R1+R2-R3+FI
118      S=S+DS
119      200 CONTINUE
120 C
121 C ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ
122 C
123      B(1,1)=1./DS 0 B(2,1)=0.-1.5/DS 0 B(2,2)=2./
124          DS 0 B(2,3)=0.-0.5/DS
125      B(N,1)=B(2,3)
126      R(N,2)=B(2,2)
127      R(N,3)=B(2,1)
128      B(N-1,1)=0.-1./DS**2
129      B(N-1,2)=4./DS**2
130      B(N-1,3)=0.-5./DS**2
131      B(N-1,4)=2./DS**2
132      R(1,1)=0. 0 R(2,1)=0. 0 R(N,1)=0.
133      R40=W(N+1)*D/2-H
134      IF(R40) 70,80,80
135      70 C=0. 0 GO TO 99
136      80 C=CNUL
137      IF(AL(N,3).LE.0.) C=0.
138      99 R(N-1,1)=C*R40*2*DS

```

```

137 C РЕШЕНИЕ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ОДНОГО ШАГА ПО ВРЕ
      МЕНИ
138 C
139     CALL BLEQ (B,N,5,1,150*PI)
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 ВЪЧИСЛЕНИЕ ВЫТАЯКИВАЮЩЕЙ СИЛЫ
147 C
148     COMMON /BL2/D,M,BETA,FTR,CNUL,P,QNUL,EPS/BL1
      /M1,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 ВЪЧИСЛЕНИЕ РЕАКЦИИ ГРУНТА
163 C
164     COMMON /BL2/D,M,BETA,FTR,CNUL,P,QNUL,EPS/BL1
      /M1,DS,DT/BL3/AL,W
165     DIMENSION W(150),AL(150,3)
166     GL=W(K)+D/2.-M
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/M1,DS,DT/BL2/D,M,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)=0.0 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
189 C   КВАДРАТИЧНАЯ ИНТЕРПОЛЯЦИЯ AL(LFV) И W(LEV)
190 C
191      KA=INT(DL/DS) 0 RA=DL-DS*KA 0 RB=DS+RA
192      KA=KA+1
193      AL(150,3)=AL(KA-1,3)+(AL(KA,3)-AL(KA-1,3))*R
194          A/DS+(AL(KA+1,3)-2*
195      W(150)=W(KA-1)+(W(KA)-W(KA-1))*RB/DS+(W(KA+1
196          1-2*W(KA)+W(KA-1))*RB
197          2*RA/(2*DS**2)
198      13 T(1)=TENS 0 T(2)=T(1) 0 NA=N-1
199      DO 15 I=2,NA
200          CALL AXTEN(I,GR,TR)
201          T(I+1)=T(I-1)-2*DS*(GR+SIGN(TR,T(I)))
202      15 CONTINUE
203      RETURN
204      END
205      SUBROUTINE AXTEN(K,GR,TR)
206      COMMON /R13/AL,W,N,T,X,TENS,TIME,CLIN,DAL,AV
207          EL,KS/BL2/D,M,BETA,
208      2FTR,CNUL,P,CNUL,EPS/BLI/M1,DS,DT
209      DIMENSION AL(150,3),W(150),T(150),DAL(150),X
210          (150)
211      IF(K.NE.1) GO TO 21
212      DADS=(4*AL(K+1,3)-3*AL(K,3)-AL(K+2,3))/(2*DS
213          )
214      DA2DS=(2*AL(K,3)-5*AL(K+1,3)+6*AL(K+2,3)-AL(
215          K+3,3))/DS**2
216      GO TO 23
217      21 IF(K.NE.N) GO TO 22
218      DADS=(4*AL(K-1,3)-3*AL(K,3)-AL(K-2,3))/(2*DS
219          )
220      DA2DS=(2*AL(K,3)-5*AL(K-1,3)+6*AL(K-2,3)-AL(
221          K-3,3))/DS**2
222      GO TO 23
223      22 DADS=(AL(K+1,3)-AL(K-1,3))/(2*DS)
224      DA2DS=(AL(K+1,3)-2*AL(K,3)+AL(K-1,3))/DS**2
225      23 DAL(K)=DADS
226      IF (K*DS-DS/2-N*LIN) 267,24,24
227      BE=1.+BETA 0 GO TO 28
228      BE=1.
229      P1=DADS*DA2DS
230      P2=P*BE*SIN(AL(K,3))
231      P3=CNUL*0.5*W(K)*DADS**2
232      GR=P1+P2-P3
233      IF (W(K)*D/2-M) 29,30,30
234      TR1=0. 0 GO TO 31
235      29 TR1=FTR
236      30
237      31
238

```

```

229      GR=P1+P2
230      31 TR=CNUL*(W(K)+D/2-H)*TR1*COS(AL(K,3))
231      RETURN
232      END
233      SUBROUTINE INFO
234      C
235      C ВВОД РЕЗУЛЬТАТОВ СЧЕТА ПО ЭТАПАМ
236      C
237      COMMON /BL3/AL,W,N,T,X,TENS,TIME,DLIN,DAL,AV
                EL,KS
238      DIMENSION AL(150,3),W(150),T(150),DAL(150),X
                (150)
239      DO 1 I=1,N
240      CALL AXTEN(I,GR,TR)
241      1 CONTINUE
242      PRINT 21,TIME,DLIN,W(150),AL(150,3),AV,EL,TE
                S
243      21 FORMAT (/5HTIME=,F8.4,7H DLIN=,F7.4,7H WLE
                V=,F7.4,7H ALEV=,
244      2F7.4,7H VELA=,E12.6,7X,7H TENS=,F7.0)
245      PRINT 22
246      22 FORMAT (/14X,1HX,20X,1HW,16X,10HРАСТЯЖЕНИЕ,1
                1X,5HMЗГНБ;
247      216X,4HУГОЛ/)
248      PRINT 23,(X(I),W(I),T(I),DAL(I),AL(I,3),I=1,
                N,KS),X(N+1),W(N+1)
249      23 FORMAT(05(8X,E13.6))
250      RETURN
251      END

```

ПРОГРАММА ГЕМ

расчета перемещений и напряжений в подводном трубопроводе при опуске конца плетей

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

```

PROGRAM GEM
C ПУСК ТРУБОПРОВОДА С ПОРЕРЫШНОСТИ НА БОЛЬШЕЕ ГЛУБИНЫ
CСММММ /C11/Н2/IS,DT/BL2/С,Н,ВЕТА,ЕТР,СМЛ,Р,ВМЛ,
* EPS
2 /BL4/ XAPPA,V,ALIM,OHIT,MVAM
3 /EL3/AL,K,N,T,X,TIME,CLIN,CAI,AVEL,KS
DIMENSION AL(150,3),P(150),T(150),PAI(150),X(150)
READ *CXCOPPEX ДАННЫХ
15 READ 41,IVAR,N,KS,C,H,ВЕТА,ЕТР,СМЛ,Р,ВМЛ,EPS, DELT,
2XAPPA,V,ALIM,HI
41 FORMAT (3(I3,2X)/(A(F8,1X)))
DS=1./N
DT=DS*XAPPA
PRINT 42,MVAR
42 FORMAT (//16X, 'ВНИМАТЕЛЬНАЯ ТРУБОПРОВОДА СРОБОДНЫ
2 ПОГРУЖЕНИЕМ /16X, 7HВАРКАНТ,2X,13)
PRINT *CXCOPPEX ДАННЫХ
PRINT 43,P,ВМЛ,С,Н,ВЕТА,ЕТР,СМЛ,EPS,DS,DT,V,ALIM
43 FORMAT (/9X,4F = ,F5.5X,4F = ,F5.5X,4F = ,F6.4,5X,
*4HF = ,
*F5.3,5X,5HF = ,F5.0,5X,4HF = ,F4.2,5X,4FC = ,F8.0,5X,
*4HEPS = ,F7./
*24X,5F = ,F5.0,5X,5HDT = ,F5.3,5X,4HV = ,F6.4,5X,
*5HALIM = ,F9.6)
PRINT 44,N,KS,TRAY,TALL,TH,DELT,XAPPA,HI
44 FORMAT(9X,4F = ,I3,7X,5F = ,I2,7X,
*11DELT = ,F4.2,4X,6FXAPPA = ,F4.2,7X,5FHI = ,F4.2/)
PRINT *CXCOPPEX
TIME = .

```

```

CALL CORR2
COPROD=150 TO EPERENT
6 CALL STEP
CALL CORR
DO 21 I=1,N
IF (AL(I,3)-1,5) 21,20,20
20 CALL INFO
GO TO 14
21 CONTINUE
V1L=1-(150,3)-AL(150,1))/(2*DT)

```

```

- IF (CT,LT,100)
-                                     GO TO 7
- CALL INFO
N1=0
7 IF (N1,GT,100)
-                                     GO TO 0
- IF (ABS(V1L),LE,ALIM)
-                                     GO TO 8
- N1=N1+1
- IF (N1,GE,100)
-                                     GO TO 0
8 CALL INFO

```

```

GO TO 14
9 TIME=TIME+DT
N1=N1+V*DT
L1L=1.-V*TIME

```

```

COPROD=150 TO CB
10 DO 11 I=1,150
- AL(I,3)=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
COPROD=150 TO EPERENT
COMMON /ELZ/ H,RET,STP,CNU1,P,CNU1,EPS
/EL2/ XAPPA,V,ALIM,VELT,NVAR
/EL3/ H,K,T,X,DL,N/B(1/H),DS,DT/
DIMENSION AL(150,3),N(150),T(150),X(150),B(150,3),
NP(150,1)
N2=1.-N1
N3=0
I=0,EPS
PARAMETER /CORVIDENTOR= P(I,J)
DO 21 I=1,N
IF (S=1) 20,10,10
10 N5=1.-N5

```

```

GO TO 30
70 RE=1.
30 F(1,1)=H1/DS**4
   F(1,5)=F(1,1)
   F(1,2)=0.-4*H1/DS**4
   F(1,4)=F(1,2)
   F(1,3)=6*H1/IS**4+(E/DT**2)+EPS/DT
*FKTDF-CTCFEQU DPADEX YACTED
   F1=RE*(2*AL(1,2)-AL(1,1))/DT**2
   F2=EPS*AL(1,1)/DT
   F3=H2*(AL(1+2,1)-4*AL(1+1,1)+6*AL(1,1)-4*AL(1-1,1))+
   2*AL(1-2,1))/IS**4
   F41=T(1)*(AL(1+1,2)-2*AL(1,2)+AL(1-1,2))/DS**2
   DDFS=(D(1+1)-D(1-1))/(2*DS)
   IF ((S+DS)-D(LIN) 90,70,70
70 FFB=1.+EFTA
   IF ((S-(S)-D(LIN) 91,80,80
80 FFI=1.+EFTA
GO TO 100
90 FFE=1.
91 FEG=1.
100 F42=FF*(FFB*(GS(AL(1+1,2))-FFA*DFS(AL(1-1,2)))/(2*FS)
   F43=(FGE(1+1)-KCF(1-1))/(2.*DS)
   F1R41=(FDS+F42-F43)
   F(1,1)=F1+K2-F3+F1
   FS=F
200 CONTINUE
DPAH4HPC (CCEH)
   F(1,1)=1./FS
   F(2,1)=0.-1.5/DS
   F(2,2)=2./DS
   B(2,3)=0.-0.5/DS
   F(1,1)=F(2,3)
   F(1,2)=F(2,2)
   F(1,3)=F(2,1)
   F(1-1,1)=0.-1./IS**2
   F(1-1,2)=4./IS**2
   F(1-1,3)=0.-1./IS**2
   F(1-1,4)=2./IS**2
   F(1,1)=F(1,1)
   F(2,1)=F(1,1)
   F(4,1)=F(1,1)
   F49=(C+1)+D/2-F
   IF (F-0) 79,90,90
79 999.
GO TO 99
90 9999.
   IF (AL(1,3),0,0,0)
   C=C
99 F(1-1,3)=F49**2*IS
DPAH4HPC (CCEH) DPAH4HPC (CCEH) DPAH4HPC (CCEH) DPAH4HPC (CCEH)
CALL PLEF (S,1,5,3,150,R,F1M)
90 370 I=1,4
300 AL(1,7)=F(1,1)
   RETURN
   END

```

```

FUNCTION PGR(K)
  COMMON /BL2/D,H,BETA,FTR,CNUL,P,QNUL,FPS/BL1/H1,DS,
  *DT/BL3/AL,W

```

```

  DIMENSION K(150),AL(150,3)
  CLE=0.1/2.0
  IF(GL) 40,50,50
40  FCF=0.
  GO TO 60
50  IF(GL-D/10.) 51,52,52
51  PFC=0.UL*BL/1.
  GO TO 60
52  FCF=0.2*0.UL*1/10.+(GL-D/10.)*CNUL
40  RETURN
  END

```

```

FUNCTION C(I)
  COMMON /BL2/D,H,BETA,FTR,CNUL,P,QNUL,FPS/BL1/H1,DS,
  *DT/BL3/AL,W

```

```

  DIMENSION K(150),AL(150,3)
  C=AL(I,3)*D*0.5*(AL(K,2))
  PZ=0.1(K)+0.041
  IF(PZ) 5,5,6
5  C=0.
  GO TO 4
6  C=PZ*(K)-0.041
7  C=CNUL*(COS(1/(I,2))-K)*0.5*(AL(K+1,2)-AL(K-1,2))/DS
  IF (PZ) 10,10,0
10  C=0.5*(C+0.1)/2*(0.041)
9  RETURN
  END

```

```

SUBROUTINE PGR17
  COMMON /BL2/D,H,BETA,FTR,CNUL,P,QNUL,

```

```

  *FPS
  2/BL3/AL,K,T,X, TIME,DL,DAL,AVEI,KS
  DIMENSION AL(150,3),Y(150),Y1(150),X(150),DAL(150)
  X(1)=0.
  XCF=N+1

```

```

  DO 11 I=2,NCF
    Y(I)=(I-1)*(S*SI(AL(I-1,3)))
    X(I)=Y(I-1)*DS*0.5*(AL(I-1,3))
11 CONTINUE
  YP=DATAAL*H*DT*P(CNUL) AL(LE*) Y M(LEV)
  KA=INT(DL/DS)

```

```

  PA=DL-DS*KA  FB=DS*PA
  KA=K+1
  AL(150,3)=AL(KA-1,3)+(AL(KA,X)-AL(KA-1,3))*PB/DS+
  *AL(KA+1,3)-2*
  2 AL(KA,3)+AL(KA-1,3))*PB*PA/2*DS**2)

```



```

      PA2DS=(2*AL(K,3)-5*AL(K-1,3)+4*AL(K-2,3)-
      *AL(K-3,3))/DS**2
      GO TO 23
22  PADS=(AL(K+1,3)-AL(K-1,3))/(2*DS)
      PA2DS=(AL(K+1,3)-2*AL(K,3)+AL(K-1,3))/DS**2
23  PALK=PADS
      IF (K*DS-DS/2)-DLIN) 26,24,24
24  FE=1.+(FYA
              GO TO 28
26  FE=1.
28  P1=DAUS*PA2DS
      P2=P*FE*SIN(ZL(K,3))
      P3=RNUL*F.5*AL(K)*PADS**2
      PF=P2-P2-P3
      IF (L(K)+D/2-H) 29,30,30
29  TP1=P.
              GO TO 31
30  TP1=P*F
      PF=P1+P2
31  TP=CNUL*(H(K)+D/2-1)*TP1+COS(AL(K,3))
      RETURN
      END

```

ПРИМЕР РАСЧЕТА МАКСИМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

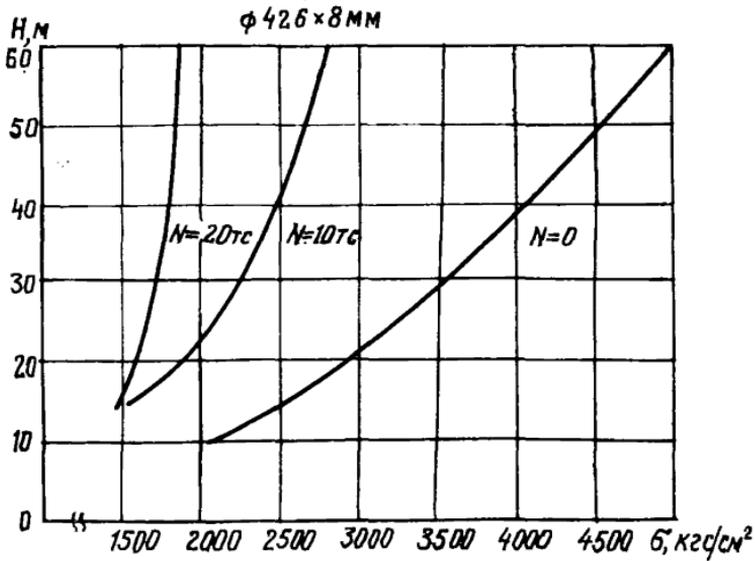


Рис.10. Зависимость максимальных продольных напряжений в трубопроводе диаметром 426 мм с толщиной стенки 8 мм от глубины укладки при различных усилиях натяжения  $N$

## СОДЕРЖАНИЕ

|   |    |
|---|----|
| Введение .....  | 3  |
| 1. Общие положения .....  | 4  |
| 2. Способы укладки подводных трубопроводов .....  | 6  |
| 3. Нагрузки и воздействия .....   | 12 |
| 4. Методика расчета напряженно-деформированного<br>состояния трубопровода при укладке ..... | 17 |
| 5. Проверка прочности и устойчивости<br>стенки трубопровода .....                           | 28 |
| Приложения .....  | 31 |

---

Руководство  
по методам расчета подводных  
трубопроводов при погружении  
на большие глубины

Р 294-77

Издание ВНИИСТА

Редактор И.Р.Белыеда                      Корректор Г.И.Михайлова  
Технический редактор Т.В.Верещага

---

|               |                                |                 |
|---------------|--------------------------------|-----------------|
| И-65332       | Подписано в печать 11.1.1979г. | Формат 60х84/16 |
| Печ.л. 3,25   | Уч.-изд.л. 2,4                 | Бум.л. 1,6      |
| Тираж 600экз. | Цена 24 к.                     | Заказ 130       |

---

Ротапринт ВНИИСТА

**РАБОТАТЬ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНО,  
БЕЗ ТРАВМ И АВАРИЙ**

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

1. Не только знать, но и строгаише 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, перчатками 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 ПРАВИЛ И НОРМ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ — ВОТ ОСНОВА МЕТОДА РАБОТЫ БЕЗ ТРАВМ И АВАРИЙ.**