РУКОВОДЯЩИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ПРОЧНОСТЬ

РТМ 24.038.08—72

Издание официальное

МИНИСТЕРСТВО ТЯЖЕЛОГО, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО И ТРАНСПОРТНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Москва

gost.e-ecolog.ru

РАЗРАБОТАН Центральным научно-исследовательским и проектно-конструкторским котлотурбинным институтом им. И. И. Ползунова

Директор	**МАРКОВ Н. М.**
Заведующий базовым отраслевым отделом стандартизации	**БАРАНОВ А. П.**
Заведующий котельным отделом	**МИХАЙЛОВ Г. Ф.**
Руководитель темы и исполнитель	**КОСТОВЕЦКИЙ Д. Л.**

ВНЕСЕН Главным управлением атомного машиностроения и котлостроения Министерства тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения

Главный инженер	**САПОЖНИКОВ А. И.**

ПОДГОТОВЛЕН К УТВЕРЖДЕНИЮ Техническим управлением Министерства тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения

Начальник Технического управления	**ПОЛИЩУК В. Л.**

СОГЛАСОВАН с Главниипроектом Министерства энергетики и электрификации СССР

Начальник Главниипроекта	**ТРОИЦКИЙ А. А.**

УТВЕРЖДЕН Министерством тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения

Заместитель министра	**СИРЫЙ П. О.**

УДК 621.643.001.24.(083.75)

Группа Е02

РУКОВОДЯЩИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ПРОЧНОСТЬ

РТМ 24.038.08—72

Указанием Министерства тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения от 22 июня 1972 г. № ПС-002/10830 срок введения установлен

с 1 января 1973 г.

Настоящий руководящий технический материал (РТМ) определяет основные требования к расчету прочности трубопроводов теплосиловых энергетических установок на совместное действие давления, весовой нагрузки и самокомпенсации температурных расширений.

На трубопроводы, рассчитываемые по настоящему РТМ, должны распространяться «Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды» [1], утвержденные Госгортехнадзором СССР.

РТМ не распространяется на:

— трубопроводы атомных энергетических установок и реакторов;

— трубопроводы транспортных установок;

— трубопроводы сосудов, на которые распространяются «Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением»;

— трубопроводы в пределах котла;

— трубопроводы сливные, продувочные, выхлопные;

— трубопроводы, снабженные сальниковыми компенсаторами;

— трубопроводы, работающие под вакуумом.

Толщина стенок труб и штуцеров, а также размеры заглушек и приварных накладок для укрепления отверстий должны опреде-

Издание официальное Перепечатка воспрещена

ляться расчетом прочности на действие давления по «Нормам расчета элементов паровых котлов на прочность» [2], утвержденным Госгортехнадзором РСФСР.

Предусмотрены различные требования к расчетам высокотемпературных и низкотемпературных трубопроводов. К высокотемпературным относятся трубопроводы из углеродистых, низколегированных марганцовистых, хромомолибденовых, хромомолибденованадиевых сталей, эксплуатирующиеся при температуре выше 370° С, и трубопроводы из аустенитных сталей с рабочей температурой выше 450° С. К низкотемпературным относятся трубопроводы, рабочая температура которых ниже указанных значений.

Предполагается, что рабочие параметры транспортируемой среды в течение полного срока службы трубопровода не изменяются. Общий рабочий срок службы высокотемпературных трубопроводов принят 100 000 ч.

Температурные напряжения, возникающие в стенке трубопровода при нестационарном режиме работы и обусловленные температурными градиентами, в РТМ не учитываются. Расчет прочности трубопровода с учетом этих напряжений, необходимый при решении вопроса о допустимости данного нестационарного режима, должен производиться по РТМ 24.038.11—72.

Для выполнения расчета прочности трубопровода по настоящему РТМ необходимо предварительно определить возникающие в нем внутренние силовые факторы. Применяющиеся для этой цели методики и программы основываются на различных классических и специальных методах раскрытия статической неопределимости. Эффективный алгоритм расчета внутренних силовых факторов в участках трубопроводной системы, основанный на специальном методе раскрытия статической неопределимости, изложен в приложении 1.

РТМ предусматривает выполнение расчета прочности трубопровода как на статическое, так и на циклическое нагружение.

Расчет низкотемпературных трубопроводов на статическое нагружение производится по формулам, полученным по методу предельного состояния (формулы для расчета трубопровода на совместное действие давления, весовой нагрузки и рабочих нагрузок промежуточных опор). Расчет же таких трубопроводов на циклическое нагружение производится по методике, основанной на исследованиях в области малоцикловой усталости и учитывающей результаты экспериментального исследования разрушения элементов трубопровода при циклическом нагружении (формулы для расчета на совместное действие давления, самокомпенсации и усилий сопротивления промежуточных опор).

Расчет высокотемпературных трубопроводов на совместное статическое нагружение давлением, весовой нагрузкой и усилиями опор в рабочем состоянии также выполняется по формулам предельного состояния. Для расчета таких трубопроводов на статиче-

ское действие всех нагружающих факторов в рабочем состоянии применяется метод максимальных напряжений при учете релаксации напряжений самокомпенсации. Цикличность нагружения высокотемпературных трубопроводов учитывается в расчете недопущением пластических перегрузок в холодном и рабочем состоянии.

РТМ обязателен для предприятий и организаций Министерства тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения и Министерства энергетики и электрификации СССР.

1. ОБОЗНАЧЕНИЯ И ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЙ ОСНОВНЫХ ВЕЛИЧИН

$D_н$ — номинальный наружный диаметр поперечного сечения трубы, *см*;

s — номинальная толщина стенки трубы, *см*;

r — средний радиус поперечного сечения $\left(r = \frac{D_н - s}{2}\right)$, *см*;

R — радиус оси криволинейной трубы, *см*;

a — начальная эллиптичность (овальность) поперечного сечения трубы (отношение разности максимального и минимального наружных диаметров сечения к их полусумме), %;

F — площадь поперечного сечения трубы, *см*^{2};

W — момент сопротивления трубы изгибу, *см*^{3};

λ — безразмерный геометрический параметр $\left(\lambda = \frac{Rs}{r^2}\right)$;

θ^* — угол между крайними сечениями криволинейной трубы;

$t_р$ — рабочая температура стенки участка трубопровода, °С;

$t_х$ — температура стенки в холодном состоянии, °С;

$t_н$ — температура нагрева участка трубопровода ($t_н = t_р - t_х$), °С;

$t_{р.ф}$, $t_{х.ф}$ — фиктивные температуры нагрева, принимаемые в расчетах для рабочего и холодного состояния;

p — рабочее давление в трубопроводе, *кгс/см*^{2};

M_x, M_y, M_z — изгибающие и крутящий моменты в сечении трубопровода, *кгс · см*;

N_z — осевая сила в сечении трубопровода, возникающая под действием весовой нагрузки и самокомпенсации температурных расширений, *кгс*;

ω — безразмерный параметр внутреннего давления $\left(\omega = 1{,}82\frac{p}{E_р}\cdot\frac{R^2}{sr}\right)$;

E — модуль упругости материала, *кгс/см*^{2};

$E_р$ — модуль упругости материала при рабочей температуре, *кгс/см*^{2};

$E_х$ — то же, в холодном состоянии, *кгс/см*^{2};

k_p — коэффициент податливости криволинейной трубы, учитывающий влияние внутреннего давления (отношение податливости на изгиб криволинейной и прямолинейной труб одинакового сечения и одинакового материала);

k_p^* — коэффициент податливости криволинейной трубы, учитывающий влияние внутреннего давления и сопряжения с прямолинейными трубами;

γ_m — коэффициент интенсификации изгибных поперечных напряжений в криволинейной трубе;

β_m — коэффициент интенсификации изгибных продольных напряжений в криволинейной трубе;

$\sigma_{пр}$ — приведенное напряжение в стенке трубы от действия внутреннего давления, *кгс/см²*;

σ_{zMN}, $\bar{\sigma}_{zMN}$ — продольные напряжения от изгибающего момента и осевой силы, *кгс/см²*;

τ — напряжение кручения, *кгс/см²*;

$\sigma_{доп}$ — допускаемое напряжение при расчете трубопровода только на действие давления, *кгс/см²*;

φ, $\varphi_н$ — коэффициенты прочности продольного и поперечного сварных стыков;

$k_п$ — коэффициент перегрузки;

K_0 — коэффициент концентрации тангенциальных напряжений около кромки бокового отверстия трубы при упругом нагружении ее давлением;

K_{01} — коэффициент концентрации тангенциальных напряжений около кромки бокового отверстия при установившейся ползучести;

c_1 — допуск на утонение стенки трубы, *см*.

2. ЭТАПЫ ПОЛНОГО РАСЧЕТА ТРУБОПРОВОДА

2.1. Для оценки прочности трубопровода, а также для определения передаваемых им усилий на оборудование и перемещений сечений его при нагреве производится полный расчет трубопровода. Он складывается из ряда расчетов (этапов) каждый из которых выполняется на совместное действие определенного частного сочетания нагружающих факторов (табл. 1).

Как видно из табл. 1, оценка прочности не требуется:

— для высокотемпературного трубопровода в расчете по этапу III;

— для низкотемпературного трубопровода в расчетах по этапам II и IV.

2.2. На этапах I, II и III полного расчета внутреннее давление на участке трубопровода принимается равным максимальному рабочему давлению транспортируемой среды на этом участке (см. [1].

Таблица 1

Этапы полного расчета трубопровода

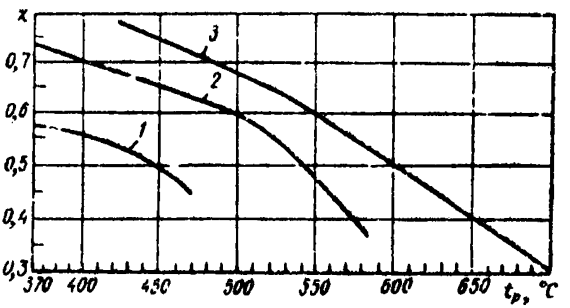
Обозначение	Содержание этапа	Учитываемые нагружающие факторы для трубопроводов		Назначение этапа для трубопроводов	
		низкотемпературных	высокотемпературных	низкотемпературных	высокотемпературных
I	Расчет на действие весовой нагрузки	Внутреннее давление; весовая нагрузка; усилия промежуточных опор в рабочем состоянии (рабочие нагрузки опор)		Оценка статической прочности на совместное действие указанных нагружающих факторов	
II	Расчет для рабочего состояния на совместное действие всех нагружающих факторов	Внутреннее давление; весовая нагрузка; усилия промежуточных опор в рабочем состоянии; температурное расширение (самокомпенсация); «собственные» смещения защемленных концевых сечений			Оценка статической прочности на совместное действие всех нагружающих факторов
		Монтажная растяжка	Саморастяжка или монтажная растяжка	Определение усилий воздействия трубопровода на оборудование	
III	Расчет на действие температурного расширения (на самокомпенсацию)	Внутреннее давление; температурное расширение; «собственные» смещения защемленных концевых сечений; усилия сопротивления промежуточных опор		Оценка усталостной прочности	
				Определение температурных перемещений (т. е. перемещений при переходе трубопровода из холодного состояния в рабочее)	
IV	Расчет для холодного (нерабочего) состояния на совместное действие всех нагружающих факторов	Весовая нагрузка; усилия промежуточных опор (нагрузки опор в холодном состоянии)			Оценка прочности
		Монтажная растяжка	Саморастяжка	Определение усилий воздействия трубопровода на оборудование	

2.3. Рабочая температура стенки участка трубопровода $t_р$ принимается равной максимальной рабочей температуре транспортируемой среды в пределах этого участка.

2.4. В расчете по этапу III в качестве температуры нагрева участка трубопровода принимается разность температур его в рабочем и холодном состоянии, т. е. $t_н = t_р - t_х$. Значение коэффициента линейного расширения металла в расчете по этапу III принимается в зависимости от рабочей температуры $t_р$.

2.5. Расчет по этапу I производится при нулевом значении температуры нагрева трубопровода (или при нулевом значении коэффициента линейного расширения) и нулевых значениях «собствен-

Графики коэффициента усреднения компенсационных напряжений для различных материалов



1 — сталь 20; 15ГС; 16ГС; *2* — 12Х1МФ; 15Х1М1Ф; 15ХМ; 12МХ; *3* — Х18Н10Т; Х18Н12Т

Черт. 1

ных» смещений концевых защемленных сечений (эти смещения вызываются температурным расширением корпуса оборудования).

2.6. Расчет низкотемпературных трубопроводов по этапу II производится при введении значений действительной температуры нагрева участков $t_н$.

При расчете высокотемпературных трубопроводов по этапу II с целью оценки прочности допускается учет саморастяжки, обусловленной релаксацией напряжений самокомпенсации. В этом случае вместо значений действительной температуры нагрева вводятся значения фиктивной (условно заниженной) температуры нагрева, определяемые по формуле

$$t_{р.ф} = \chi t_н,$$

где χ — коэффициент усреднения компенсационных напряжений, принимаемый по черт. 1 в зависимости от рабочей температуры $t_р$.

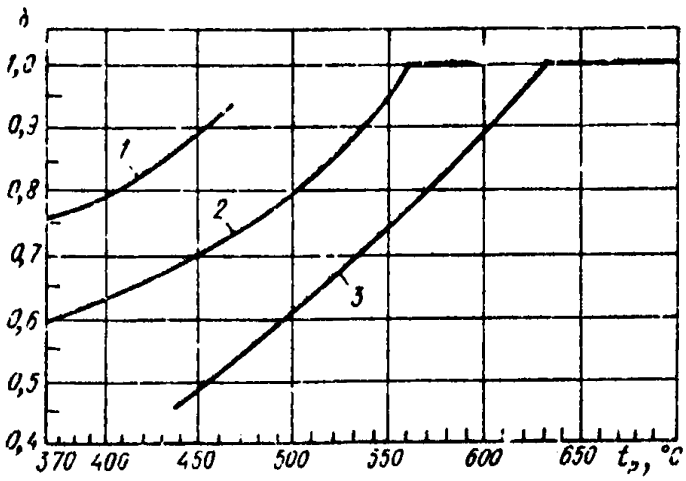
При этом вводимые в расчет значения «собственных» смещений концевых сечений также должны быть уменьшены умножением на коэффициент χ.

Во всех случаях расчет по этапу II производится при значениях коэффициента линейного расширения, соответствующих рабочей температуре участков $t_р$.

2.7. Расчет по этапу IV низкотемпературных трубопроводов выполняется при нулевом значении температуры нагрева (или нулевом значении коэффициента линейного расширения).

Расчет по этапу IV высокотемпературных трубопроводов про-

Графики коэффициента релаксации компенсационных напряжений для различных материалов



1 — сталь 20; 15ГС; 16ГС; *2* — 12Х1МФ; 15Х1М1Ф; 15ХМ; 12МХ; *3* — Х18Н10Т; Х18Н12Т

Черт. 2

изводится при введении в качестве значений температуры нагрева участков фиктивной отрицательной температуры, определяемой по формуле

$$t_{х.ф} = -\delta t_н,$$

где коэффициент δ (коэффициент релаксации компенсационных напряжений) принимается по черт. 2, и при введении значений фиктивных «собственных» смещений концевых сечений, получающихся в результате умножения значений действительных смещений на величину δ со знаком «минус». При этом принимаемые значения коэффициента линейного расширения должны соответствовать рабочей температуре $t_р$.

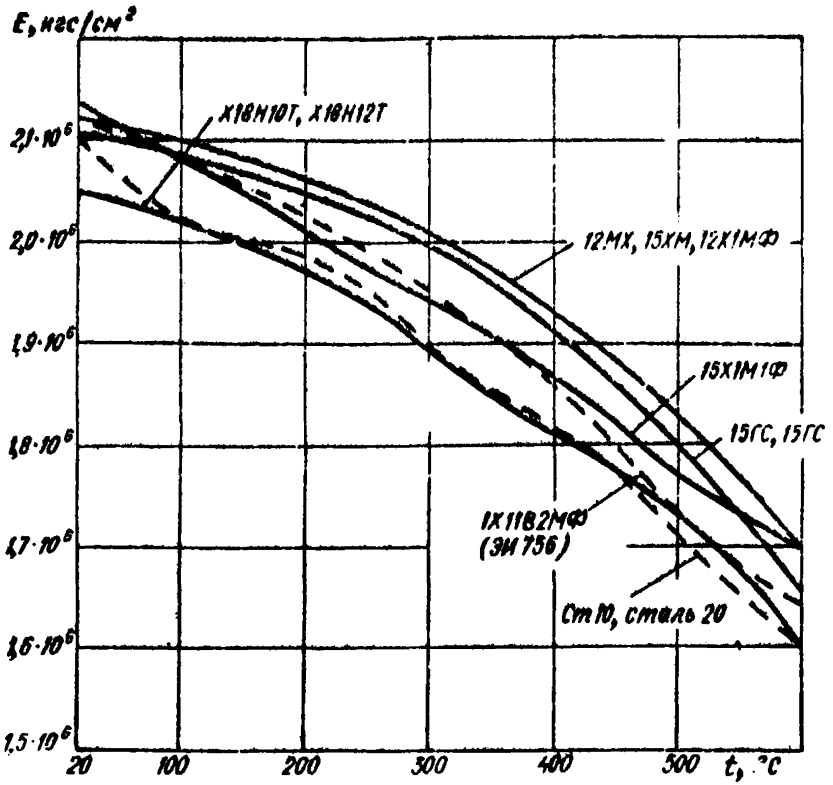
2.8. Расчет по этапам I и II производится при модулях упругости материала, соответствующих рабочей температуре $t_р$, а расчет по этапам III и IV — при модулях упругости, соответствующих

температуре холодного состояния t_x. Значение модуля упругости следует принимать по черт. 3.

2.9. Коэффициент линейного расширения материала следует принимать по черт. 4.

2.10. Расчеты по этапам I, II, IV выполняются при введении соответствующих значений усилий промежуточных упругих опор (нагрузок их в рабочем и холодном состоянии трубопровода)*.

Графики модули упругости E для трубных сталей



Черт. 3

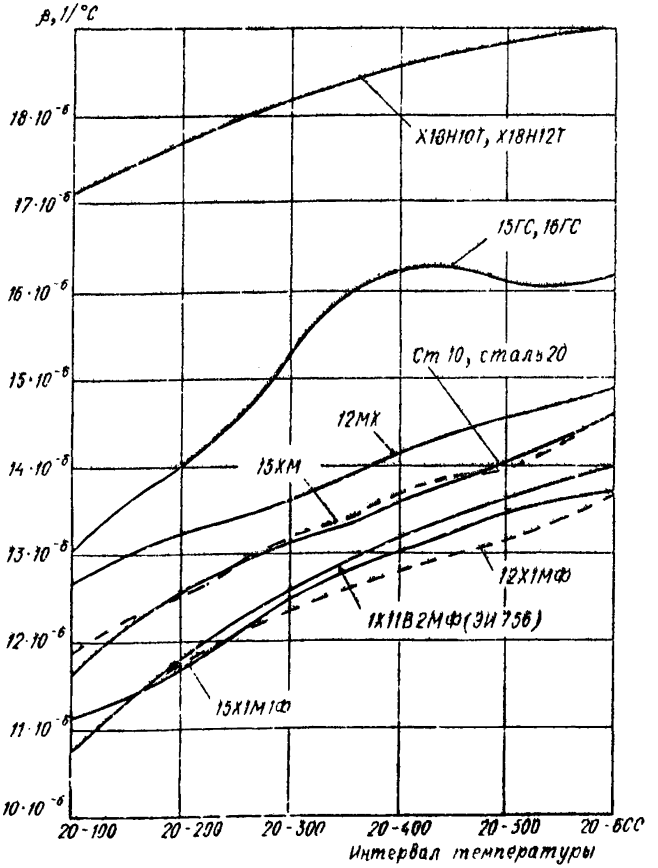
Усилия сопротивления промежуточных упругих опор, учитываемые на этапе III полного расчета, возникают в результате деформирования трубопровода при нагреве. Эти усилия (приращения нагрузок опор) автоматически учитываются, если расчет выпол-

---

Имеются программы расчета трубопроводов на ЭЦВМ, предусматривающие определение рабочих нагрузок упругих опор, а также выбор пружин для них в ходе выполнения полного расчета

няется по схеме нагреваемого трубопровода, опирающегося на упругие опоры, причем в расчет вводятся фактические жесткости этих опор.

Графики коэффициента линейного расширения для трубных сталей



Черт. 4

Воздействие на трубопровод опор скольжения и направляющих опор учитывается на всех этапах полного расчета трубопровода.

При этом на точки установки опор накладываются жесткие связи, исключающие недопускаемые опорой перемещения *.

2.11. Для низкотемпературного трубопровода, когда усилия воздействия его на оборудование в холодном состоянии могут быть определены по п. 3.3, выполнять расчет по этапу IV необязательно.

2.12. Об учете монтажной растяжки в расчетах по этапам II и IV говорится в пп. 7.6—7.9.

2.13. Если трубопровод эксплуатируется не в единственном варианте температурного состояния всех его участков, то полный расчет его следует выполнять для того варианта температурного состояния, которому соответствуют наиболее тяжелые условия нагружения. Если такой вариант температурного состояния невозможно установить без полного расчета, то расчет выполняется для различных вариантов состояния.

2.14. Если трубопровод состоит из низкотемпературных и высокотемпературных участков, допускается расчет его прочности с учетом саморастяжки высокотемпературных участков (см. пп. 2.6 и 2.7).

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ ТРУБОПРОВОДА НА ОБОРУДОВАНИЕ

3.1. Усилия воздействия трубопровода на оборудование (нагрузки на оборудование), к которому он присоединен, определяются расчетами по этапам II (для рабочего состояния) и IV (для холодного состояния). Расчетом по этапу III определяются приращения усилий трубопровода при переходе его из холодного состояния в рабочее.

3.2. Если имеются результаты расчета трубопровода по этапу II с учетом саморастяжки по способу фиктивной температуры нагрева (см. п. 2.6) и если рабочая температура и материал всех его участков одинаковы, то передаваемые нагрузки на оборудование в рабочем состоянии могут быть определены по формуле

$$X_{II}^{0} = \frac{1}{\chi}(X_{II} - X_{I}) + X_{I},$$

---

* Силы трения, возникающие в опорах скольжения и в направляющих опорах, в РТМ не учитываются. Вопрос о необходимости учета этих сил и о способе их учета должен решаться в зависимости от конкретных условий. Так, в том случае, когда опора расположена в таком месте, что она не препятствует температурным перемещениям трубопровода (например, в непосредственной близости от зацемленного конца трубопровода), можно пренебречь возникающими в ней силами трения при подсчете напряжений и перемещений. При определении нагрузки, передаваемой трубопроводом на оборудование влияние силы трения опоры, расположенной вблизи оборудования, можно учесть, вычисляя величину ее как произведение значения силы, прижимающей трубопровод к опоре (и подсчитанной без учета влияния трения), на коэффициент трения и принимая направление ее в сторону, противоположную направлению температурного перемещения.

где X_{II}^{0} — какой-либо силовой фактор (вертикальная сила, момент в горизонтальной плоскости и т. д.) из совокупности искомых усилий;

X_{II} — тот же силовой фактор, определяемый на этапе II расчета при введении коэффициента усреднения χ;

X_{I} — тот же силовой фактор, вычисляемый на этапе I расчета.

В противном случае требуется выполнить специальный расчет высокотемпературного трубопровода по этапу II с введением температуры нагрева $t_{н}$.

3.3. Если температура и материал всех участков низкотемпературного трубопровода одинаковы, усилия воздействия его на оборудование в холодном состоянии можно определить без выполнения расчета по этапу IV. При этом используется формула

$$X_{IV} = (X_{II} - X_{I}) \frac{E_{x}}{E_{p}} + X_{I} - X_{III},$$

где X_{IV} — какой-либо силовой фактор из совокупности искомых усилий;

X_{II}, X_{III} — тот же силовой фактор, вычисляемый на этапах II и III расчета.

3.4. Об учете монтажной растяжки говорится в пп. 7.6—7.10.

3.5. Допустимые нагрузки на оборудование устанавливаются заводом-изготовителем.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОДАТЛИВОСТИ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ТРУБ И СЕКТОРНЫХ КОЛЕН

4.1. При раскрытии статической неопределимости трубопровода учитывается повышенная податливость на изгиб криволинейных труб и секторных колен, для чего необходимо определять коэффициенты податливости этих элементов *.

4.2. Коэффициент податливости криволинейной трубы k_{p} вычисляется как произведение коэффициента податливости k_{p}, определяемого без учета стесненности деформации ее концов от влияния примыкающих прямолинейных труб, на коэффициент ζ, учитывающий эту стесненность деформации, т. е.

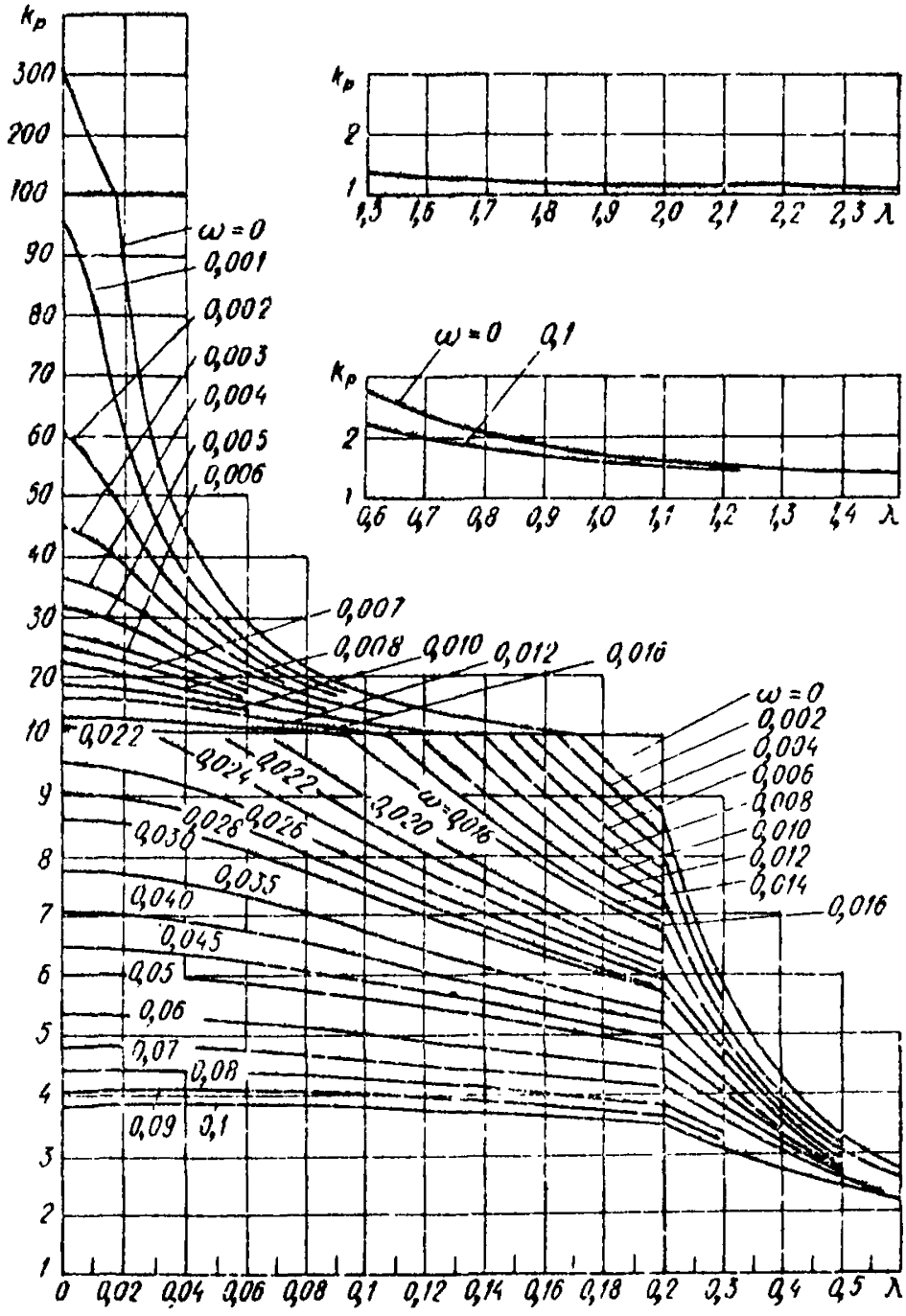
$$k_{p}^{*} = k_{p}\zeta.$$

4.3. Для определения коэффициента податливости k_{p} используется формула

$$k_{p} = 1 + \frac{1{,}125}{b} \qquad (1)$$

* Жесткость криволинейной трубы или секторного колена определяется как частное от деления на коэффициент податливости произведения момента инерции поперечного сечения на модуль упругости материала.

Графики коэффициента k_p



Черт. 5

Величина b вычисляется по следующим формулам:

$$\left.\begin{aligned} a_1 &= 1{,}010 + 1633\lambda^2 + 99\omega; \\ a_2 &= 1{,}016 + 661\lambda^2 + 63\omega - \frac{0{,}2316}{a_1}; \\ a_3 &= 1{,}028 + 204\lambda^2 + 35\omega - \frac{0{,}2197}{a_2}; \\ a_4 &= 1{,}062 + 37{,}5\lambda^2 + 15\omega - \frac{0{,}1914}{a_3}; \\ b &= 0{,}125 + 1{,}5\lambda^2 + 3\omega - \frac{0{,}0977}{a_4}. \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

Параметры λ и ω вычисляются по формулам:

$$\lambda = \frac{Rs}{r^2}; \quad \omega = 1{,}82\,\frac{p}{E_p}\cdot\frac{R^2}{sr}.$$

4.4. Можно определять коэффициент k_p также по черт. 5 и по табл. 2. При использовании табл. 2 коэффициент k_p для промежуточных значений λ и ω можно находить без интерполирования (берется значение k_p, соответствующее ближайшим указанным в табл. 2 значениям λ и ω).

Таблица 2

Значения коэффициента k_p

λ	ω									
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,20	8,68	7,29	6,23	5,64	5,11	4,68	4,34	4,06	3,82	3,62
0,21	8,26	7,02	6,14	5,45	5,00	4,60	4,27	4,00	3,77	3,57
0,22	7,88	6,76	5,96	5,36	4,89	4,51	4,20	3,94	3,72	3,53
0,23	7,54	6,52	5,78	5,22	4,78	4,42	4,13	3,88	3,67	3,49
0,24	7,22	6,30	5,62	5,10	4,63	4,34	4,06	8,82	3,62	3,44
0,25	6,92	6,09	5,45	4,97	4,58	4,26	3,99	3,76	3,57	3,40
0,26	6,65	5,88	5,31	4,85	4,48	4,18	3,92	3,71	3,52	3,36
0,27	6,39	5,70	5,16	4,73	4,39	4,10	3,86	3,65	3,47	3,32
0,28	6,16	5,52	5,01	4,62	4,30	4,02	3,79	3,60	3,42	3,28
0,29	5,94	5,35	4,89	4,51	4,21	3,94	3,73	3,54	3,38	3,24
0,30	5,73	5,19	4,76	4,41	4,12	3,88	3,67	3,49	3,33	3,19
0,32	5,35	4,89	4,51	4,21	3,95	3,74	3,55	3,38	3,24	3,11
0,34	5,01	4,62	4,30	4,03	3,80	3,60	3,43	3,28	3,15	3,03
0,36	4,71	4,38	4,20	3,85	3,65	3,47	3,32	3,18	3,06	2,95
0,38	4,44	4,15	3,91	3,69	3,51	3,35	3,21	3,09	3,00	2,88

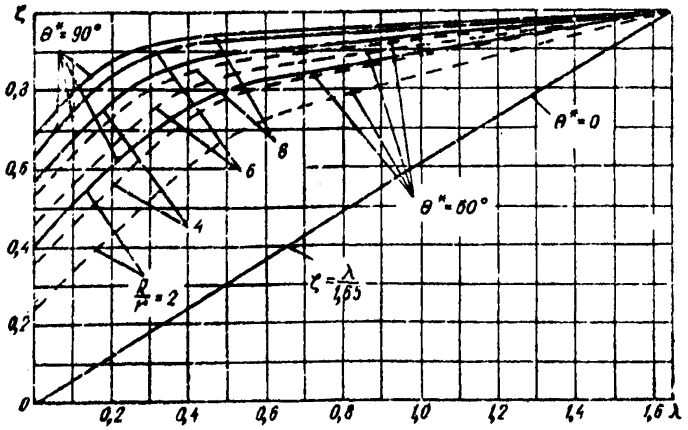
Продолжение табл. 2

λ	ω									
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,40	4,20	3,95	3,73	3,54	3,38	3,24	3,11	3,00	2,90	2,80
0,42	3,98	3,76	3,58	3,41	3,26	3,13	3,02	2,91	2,82	2,73
0,44	3,79	3,59	3,43	3,28	3,14	3,03	2,92	2,83	2,74	2,66
0,46	3,61	3,44	3,29	3,15	3,04	2,93	2,84	2,75	2,67	2,60
0,48	3,44	3,29	3,16	3,04	2,94	2,84	2,75	2,63	2,60	2,54
0,50	3,29	3,16	3,04	2,94	2,84	2,75	2,68	2,60	2,54	2,48
0,52	3,16	3,04	2,93	2,84	3,75	2,67	2,60	2,54	2,47	2,42
0,54	3,03	2,92	2,83	2,74	2,67	2,60	2,53	2,47	2,42	2,36
0,56	2,91	2,82	2,74	2,66	2,59	2,52	2,46	2,41	2,36	2,31
0,58	2,81	2,72	2,65	2,58	2,51	2,46	2,40	2,35	2,30	2,26
0,60	2,71	2,63	2,56	2,50	2,44	2,39	2,34	2,29	2,25	2,21
0,62	2,62	2,55	2,49	2,43	2,38	2,33	2,28	2,24	2,20	2,16
0,64	2,53	2,47	2,41	2,36	2,32	2,27	2,23	2,19	2,16	2,12
0,66	2,45	2,40	2,35	2,30	2,26	2,21	2,18	2,14	2,11	2,08
0,68	2,38	2,33	2,28	2,24	2,20	2,17	2,13	2,10	2,07	2,04
0,70	2,32	2,27	2,22	2,19	2,15	2,12	2,09	2,06	2,03	2,00
0,75	2,17	2,13	2,10	2,07	2,04	2,01	1,98	1,96	1,93	1,91
0,80	2,04	2,01	1,99	1,96	1,94	1,91	1,89	1,87	1,85	1,83
0,85	1,93	1,91	1,89	1,87	1,85	1,83	1,81	1,79	1,78	1,76
0,90	1,84	1,82	1,80	1,79	1,77	1,76	1,74	1,73	1,71	1,70
0,95	1,76	1,75	1,73	1,72	1,70	1,69	1,68	1,67	1,66	1,64
1,00	1,69	1,68	1,67	1,66	1,65	1,63	1,62	1,61	1,60	1,59
1,05	1,63	1,62	1,61	1,60	1,59	1,58	1,57	1,57	1,55	1,55
1,10	1,58	1,57	1,56	1,55	1,55	1,54	1,53	1,52	1,52	1,51
1,15	1,53	1,53	1,52	1,51	1,50	1,50	1,49	1,48	1,48	1,47
1,20	1,49	1,49	1,48	1,47	1,47	1,46	1,46	1,45	1,45	1,44
1,30	1,42	1,42	1,41	1,41	1,40	1,40	1,40	1,39	1,39	1,38
1,40	1,37	1,36	1,36	1,36	1,35	1,35	1,35	1,34	1,34	1,34
1,50	1,32	1,32	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,30	1,30	1,30
1,60	1,28	1,28	1,28	1,28	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27
1,70	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24
1,80	1,23	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,21	1,21	1,21

4.5. Для труб, значения λ и ω которых удовлетворяют условиям $1{,}6 \geqslant \lambda \geqslant 0{,}1$ и $\omega \leqslant 0{,}001$, коэффициент k_p можно определять по формуле

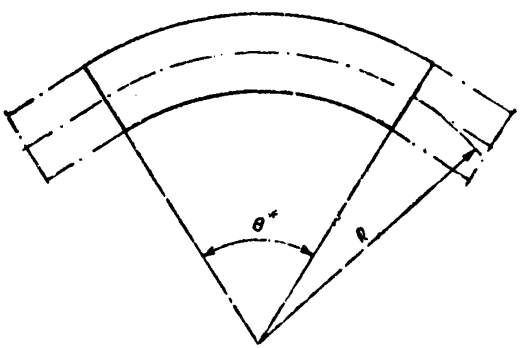
$$k_p = \frac{1{,}65}{\lambda}.$$

Графики коэффициента ζ.



Черт. 6

Криволинейная труба



Черт. 7

4.6 Коэффициент ζ можно определять по черт. 6 в зависимости от геометрического параметра трубы λ, угла θ^* между крайними сечениями трубы и отношения радиусов R/r (см. черт. 7). Для про-

межуточных значений угла θ^* и отношения R/r коэффициент ζ определяется по методу линейной интерполяции, при этом значение ζ для угла $\theta^*=0$ принимается по формуле

$$\zeta=\frac{\lambda}{1{,}65}$$

(нижний график черт. 6).

При составлении программы расчета трубопроводов можно использовать для вычисления коэффициента ζ данные табл. 3.

Таблица 3

Значения коэффициента ζ

λ	Угол θ^*			
	60°	90°	60°	90°
	$R/r=2$		$R/r=4$	
0	0,25	0,42	0,37	0,58
0,40	0,62	0,77	0,73	0,88
0,60	0,73	0,84	0,82	0,91
1,65	1,00	1,00	1,00	1,00
	$R/r=6$		$R/r=8$	
0	0,47	0,65	0,55	0,70
0,20	0,67	0,85	0,74	0,88
0,40	0,81	0,93	0,85	0,95
1,65	1,00	1,00	1,00	1,00

4.7. Влияние стесненности деформации концов можно не учитывать (принимается $\zeta=1$) для некоторых n криволинейных труб (криволинейных отрезков) данного трубопровода, если выполняется условие

$$\sum_{n} k_{pi}\varepsilon_i(1-\zeta_i)\leqslant 0{,}05. \qquad (3)$$

Здесь ζ_i — коэффициент, учитывающий стесненность деформации концов для i-й криволинейной трубы; ε_i — отношение длины i-й криволинейной трубы к суммарной длине трубопровода, при подсчете которой длины криволинейных труб принимаются как произведение истинной длины на коэффициент податливости k_p, т. е.

$$\varepsilon_i=\frac{L_{кр\,i}}{L_{пр}+\Sigma k_{pi}L_{кр\,i}}, \qquad (4)$$

где $L_{кр\,i}$ — истинная длина i-й криволинейной трубы;

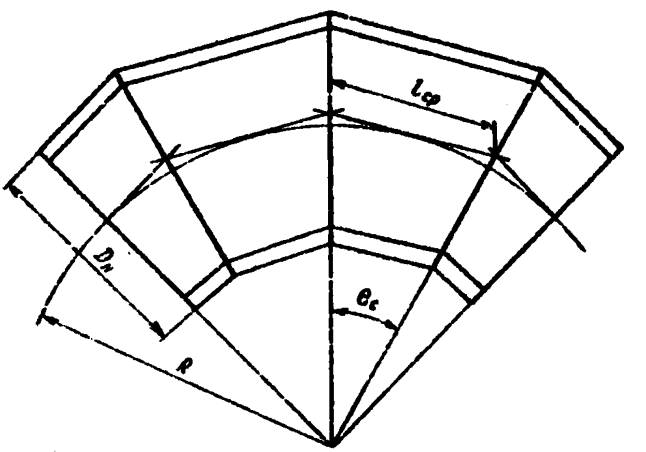
$L_{пр}$ — суммарная длина всех прямолинейных труб (прямолинейных отрезков) трубопровода.

В формуле (3) суммирование распространяется на рассматриваемые криволинейные трубы, а в формуле (4) — на все криволинейные трубы трубопровода.

4.8. Для труб с $\lambda \geqslant 2{,}2$ можно принимать $k_p^* = 1$.

Для труб, имеющих значение геометрического параметра $\lambda \geqslant 1{,}65$ или значение угла $\theta^* > 90°$, принимается $\zeta = 1{,}0$.

Колено, выполненное сваркой из прямых секторов (секторное колено)



Черт. 8

4.9. Для расчета трубопровода по этапу IV коэффициент податливости следует определять при $p = 0$.

4.10. Коэффициент податливости колена, сваренного из прямолинейных секторов (секторного колена), определяется согласно указаниям пп. 4.2—4.9. При этом радиус колена вычисляется по формуле (см. черт. 8)

$$R = \frac{l_{ср}}{2\,tg\frac{\theta_c}{2}},$$

где $l_{ср}$ — длина сектора по центральной оси;

θ_c — угол между его крайними сечениями.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ

5.1. Напряжения определяются в концевых и промежуточных сечениях трубопровода. Внутренние силовые факторы (изгибающие моменты M_x, M_y, крутящий момент M_z и осевая сила N_z), при-

применяемые для расчета напряжений, определяются расчетом трубопровода по соответствующему этапу.

5.2. Определение напряжений на этапе I полного расчета

5.2.1. На этапе I полного расчета трубопровода определяются эффективные напряжения в его поперечных сечениях. Формулы, служащие для вычисления этих напряжений, получены по методу предельного состояния и характеризуют напряженное состояние поперечного сечения в целом.

5.2.2. Для поперечных сечений прямолинейных и криволинейных труб эффективное напряжение определяется по формуле (см. также п. 5.2.3).

$$\sigma_{эф} = \sqrt{0{,}75\sigma_{пр}^2 + \bar{\sigma}_{zMN}^2} + 3\tau^2.$$

Приведенное напряжение от внутреннего давления вычисляется по формуле

$$\sigma_{пр} = \frac{p\,|D_н - (s - c_1)|}{2\varphi\,(s - c_1)}. \qquad (5)$$

Значение допуска на утонение стенки c_1 принимается по техническим условиям на поставку труб, идущих на изготовление трубопровода.

Для труб с продольным или спиральным двусторонним сварным швом из углеродистой, низколегированной марганцовистой, хромомолибденовой и аустенитной стали при проведении контроля качества шва по всей длине неразрушающими методами $\varphi = 1$. Если эти условия не выполняются, то для сварных труб из тех же сталей $\varphi = 0{,}7$. Для труб из хромомолибденованадиевой и высокохромистой стали с двусторонним швом при 100%-ном контроле шва неразрушающими методами $\varphi = 0{,}8$.

Продольное напряжение от изгибающего момента и осевой силы и напряжение кручения вычисляются по формулам:

$$\bar{\sigma}_{zMN} = k_н \left(\frac{0{,}8\,|\,\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\varphi_н W} + \frac{|\,N_z\,|}{F} \right);$$

$$\tau = \frac{k_н M_z}{2W}. \qquad (6)$$

Момент сопротивления W и площадь поперечного сечения определяются по формулам:

$$W = 0{,}0982 D_н^3 \left[1 - \left(\frac{D_н - 2s}{D_н} \right)^4 \right];$$

$$F = \pi s\,(D_н - s).$$

Коэффициент прочности поперечного сварного стыка при изгибе принимается по табл. 4.

Таблица 4

Значения коэффициента $\varphi_п$

Тип труб	Сталь	$\varphi_п$
Катаные, сварные	Аустенитная, высокохромистая	0,6
Механически обработанные *	То же	0,7
Катаные, сварные	Хромомолибденовая, хромомолибденованадиевая, углеродистая, марганцовистая	0,8
Механически обработанные	То же	0,9

* Ковано-сверленые, горячепрессованные и т. п.

Коэффициент перегрузки $k_п$ принимается по п. 5.2.4.

5.2.3. Для криволинейных труб, геометрический параметр которых удовлетворяет условию $\lambda \leqslant 1{,}4$, дополнительно к расчету по п. 5.2.2 вычисляется эффективное напряжение по формуле

$$\sigma_{эф} = k_п \frac{\Omega}{\Psi} \cdot \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{W}.$$

Значения величин Ω и Ψ принимаются по черт. 9 и 10. Значение $\sigma_{пр}$ определяется по формуле (5), а значение $\sigma_{доп}$ — по п. 6.4. При $\lambda \geqslant 0{,}05$ значение Ω можно определять также по формуле

$$\Omega = 0{,}93\lambda^{-0{,}755}.$$

Коэффициент перегрузки $k_п$ принимается согласно п. 5.2.4.

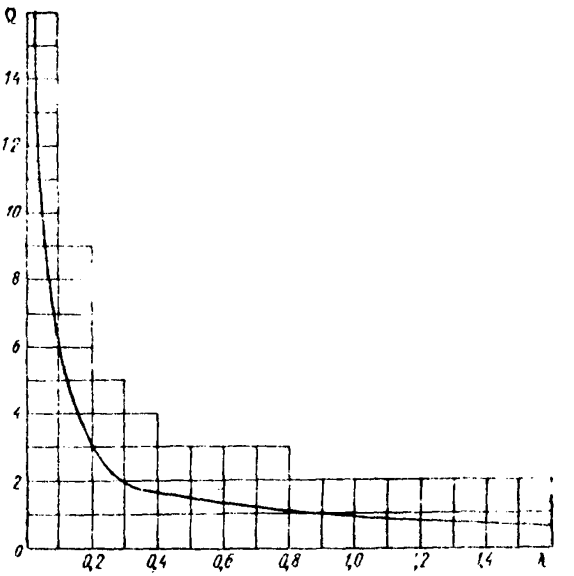
5.2.4. При выполнении расчета трубопровода без существенных упрощений (учтены все ответвления и опоры и т. п.) и при его монтаже по действующим инструкциям коэффициент перегрузки $k_п$ принимается равным 1,4.

Если дополнительно к указанным условиям производится специальная корректировка затяжки пружин промежуточных опор для учета отклонений фактических значений весовой нагрузки, жесткости пружин опор и температурных перемещений от принятых в расчете значений, а также выполняется наладка трубопровода, может быть принято $k_п = 1{,}2$.

Для несложных малогабаритных трубопроводов, когда не применяются промежуточные опоры, а напряжения от весовой нагрузки малы (не более 100 *кгс/см*^{2}), также можно принимать $k_п = 1{,}2$.

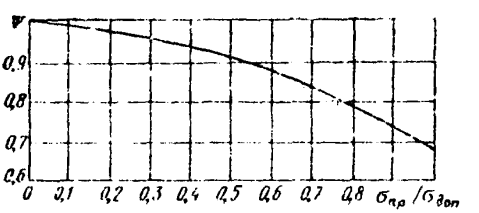
При выполнении расчета трубопровода с введением некоторых упрощений (например, пренебрежение влиянием какого-либо ответвления) коэффициент перегрузки должен быть больше 1,4; конкретное значение $k_п$ следует устанавливать с учетом возможной погрешности определения внутренних силовых факторов (M_x, M_y, M_z, N_z).

График коэффициента Ω



Черт. 9

График коэффициента Ψ



Черт. 10

5.3. Определение напряжений на этапе II полного расчета

5.3.1. На этапе II полного расчета определяются эквивалентные напряжения, соответствующие наиболее напряженным точкам поперечных сечений трубопровода.

5.3.2. Для прямолинейных труб и криволинейных труб с $\lambda \geq 1{,}0$ используется формула

$$\sigma_{экв} = \sqrt{0{,}75\sigma_{пр}^2 + \sigma_{zMN}^2 + 3\tau^2}.$$

Напряжения $\sigma_{пр}$, τ вычисляются соответственно по формулам (5), (6), а напряжение σ_{zMN} — по формуле:

$$\sigma_{zMN} = k_н \left(\frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\varphi_н W} + \frac{|N_z|}{F} \right). \qquad (7)$$

Коэффициент перегрузки $k_н$ принимается по п. 5.2.4, а коэффициент прочности сварного стыка $\varphi_н$ — по табл. 4.

5.3.3. Для криволинейных труб (при любом значении λ) вычисления производятся по следующим четырем формулам:

$$\left.\begin{aligned}
\sigma_{экв} &= \frac{1}{W}\sqrt{\left|(k_н^* M_x + \gamma_э M_э)\right|\gamma_m + \left|k_н M_y\right|\beta_m + 0{,}5W\sigma_{пр}\right|^2 + \overline{+ (k_н M_z)^2}};\\
\sigma_{экв} &= \frac{1}{W}\sqrt{\left|(k_н^* M_x + \gamma_э M_э)\right|\beta_m + \left|k_н M_y\right|\gamma_m + 0{,}5W\sigma_{пр}\right|^2 + \overline{|(k_н M_z)^2}};\\
\sigma_{экв} &= \frac{1}{W}\sqrt{\left|(k_н^* M_x + \gamma_э M_э)\right|\gamma_m + W\sigma_{пр}\right|^2 + (k_н M_z)^2};\\
\sigma_{экв} &= \frac{1}{W}\sqrt{(|k_н M_y|\gamma_m + W\sigma_{пр})^2 + (k_н M_z)^2}.
\end{aligned}\right\} \qquad (8)$$

Для оценки прочности берется большее из четырех значений.

Величина $M_э$ определяется по формуле:

$$M_э = -pW\frac{R}{r}\cdot\frac{D_н}{s}\cdot\frac{a}{100},$$

где a — начальная эллиптичность (овальность) поперечного сечения, %; значение ее принимается согласно п. 5.8 *.

Изгибающий момент M_x действует в плоскости оси криволинейной трубы, а момент M_y — в плоскости, перпендикулярной к плоскости оси трубы (черт. 11). Момент M_x считается положительным, если направлен в сторону увеличения кривизны оси трубы.

---

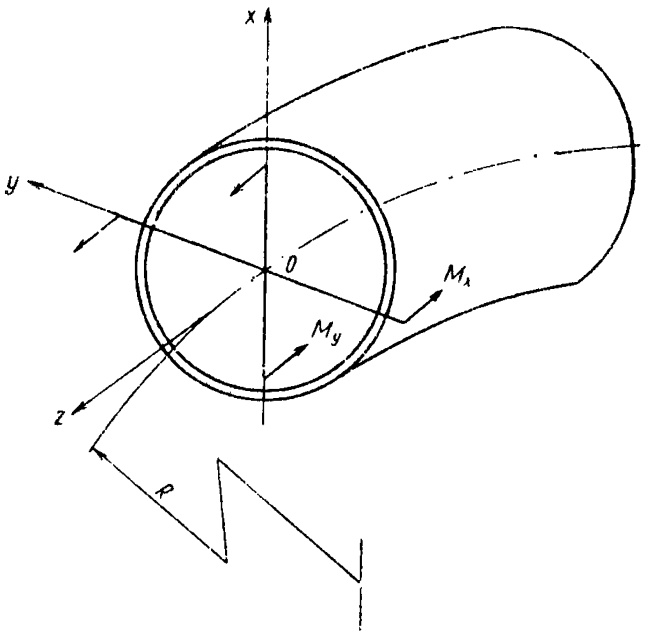
* В том случае, когда начальная эллиптичность сечения не учитывается, расчет криволинейных труб по пп. 5.3.3, 5.4.3 и 5.5.3 можно не производить при $\lambda > 1{,}0$.

Коэффициент $\chi_э$ используется для учета уменьшения напряжений, обусловленных начальной эллиптичностью сечения, вследствие ползучести. Его можно определять по формуле

$$\chi_э = 1{,}2\chi,$$

причем χ принимается по черт. 1.

Изгибающие моменты в сечении криволинейной трубы



Черт. 11

Коэффициент $k_п$ принимается согласно п. 5.2.4, а коэффициент $k_п^*$ при $M_x > 0$ и

$$\frac{|M_э|}{M_x} \geq \frac{1}{2\gamma_э}\left(k_п + \frac{1}{k_п}\right)$$

принимается $k_п^* = \frac{1}{k_п}$; в остальных случаях $k_п^* = k_п$.

Коэффициенты γ_m и β_m определяются по п. 5.6. Напряжение $\sigma_{пр}$ подсчитывается по формуле (5).

5.3.4. Для трубы с боковым отверстием, в которое вваривается труба или штуцер (т. е. для тройникового узла), эквивалентные напряжения определяются с учетом концентрации напряжений около кромки отверстия *. Расчет выполняется для двух сечений, распо-

* Расчеты прочности тройниковых узлов в соответствии с пп. 5.3.4, 5.4.4, 5.5.4 и 6.2 являются ориентировочными. Допускается корректировка их с учетом новых научных данных. Выполнение этих расчетов является рекомендуемым, а не обязательным.

ложенных около кромки отверстия с обеих сторон (на черт. 12 эти сечения обозначены черточками). При этом применяется формула

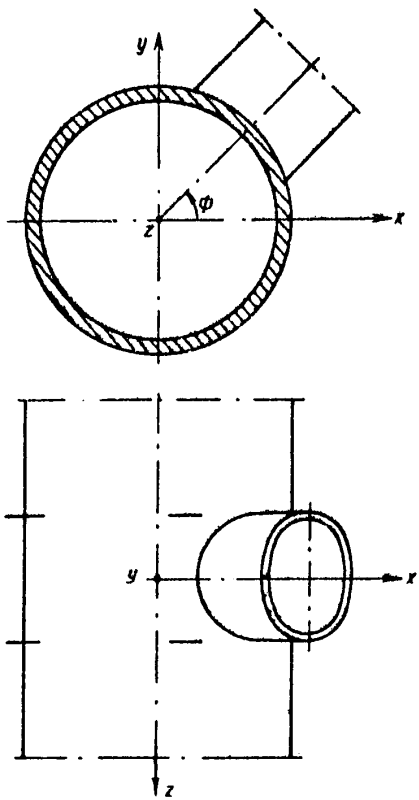
$$\sigma_{экв} = \sqrt{(\sigma_{пр}K_{01})^2 + (k_{п}^{*}\sigma_{zMN}^{0} + 0{,}5\sigma_{пр})^2 - \cdots}$$

$$\cdots - \sigma_{пр}K_{01}(k_{п}^{*}\sigma_{zMN}^{0} + 0{,}5\sigma_{пр}) + 3\tau^2}, \qquad (9)$$

где

$$\sigma_{zMN}^{0} = \frac{M_x \sin\Phi - M_y \cos\Phi}{W} + \frac{N_z}{F}.$$

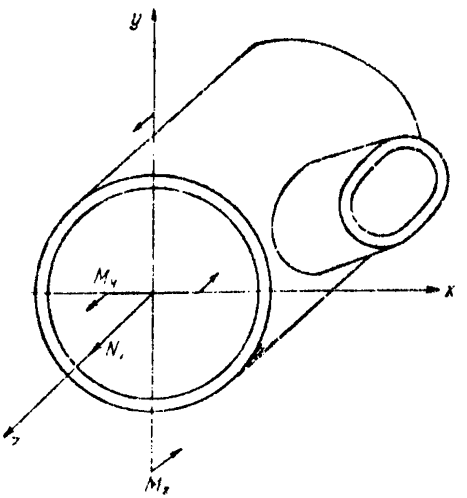
Тройниковый узел (труба со штуцером)



Черт. 12

Силовые факторы M_x, M_y, N_z считаются положительными, если направлены так, как показано на черт. 13. Угол Ф характеризует положение отверстия (см. черт. 12)

Силовые факторы в поперечном сечении тройникового узла



Черт. 13

Если $\sigma^0_{zMN} > 0$ и $\frac{\sigma^0_{zMN}}{\sigma_{пр}} < (K_{01} - 1)\frac{k_п}{k_п^2 - 1}$, то $k_п^* = \frac{1}{k_п}$; в других случаях $k_п^* = k_п$. Коэффициент $k_п$ принимается согласно п. 5.2.4.

Коэффициент концентрации напряжений определяется по формуле

$$K_{01} = 1 + \frac{1,5}{m},$$

где m — показатель ползучести стали, принимаемый по черт. 14 *.

Для равнопроходного или почти равнопроходного тройникового узла (отношение большего наружного диаметра к меньшему не более 1,1) дополнительно к расчету по формуле (9) определяется эквивалентное напряжение по формуле

$$\sigma_{экв} = \frac{1}{W}\sqrt{(k_п\gamma_m\sqrt{M_x^2 + M_y^2} + W\sigma_{пр})^2 + (k_п M_z)^2}, \qquad (10)$$

причем коэффициент γ_m определяется по п. 5.6 в зависимости от геометрического параметра λ, определяемого в данном случае как отношение толщины стенки к среднему радиусу поперечного сечения ($\lambda = s/r$), и параметра ω, определяемого по формуле

$$\omega = 1,82\frac{p}{E_р}\cdot\frac{r}{s}.$$

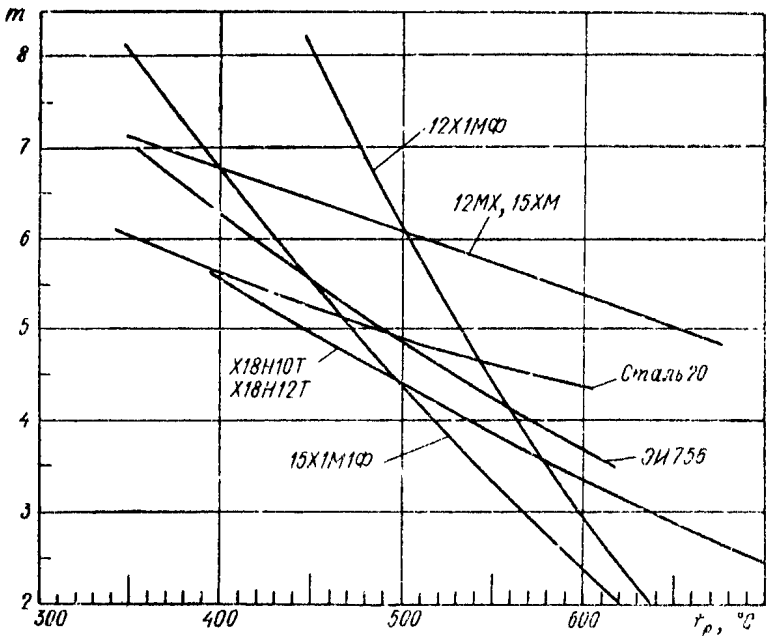
Расчет по формуле (10) выполняется для сечений всех трех трубопроводных участков, сходящихся в данном тройниковом узле (эти сечения обозначены на черт. 15 черточками).

Входящее в формулы (9) и (10) значение напряжения $\sigma_{пр}$ определяется по формуле (5). Напряжение τ вычисляется по формуле (6). Подсчет $\sigma_{пр}$, W, F, λ производится по геометрическим размерам, соответствующим расчетным сечениям.

---

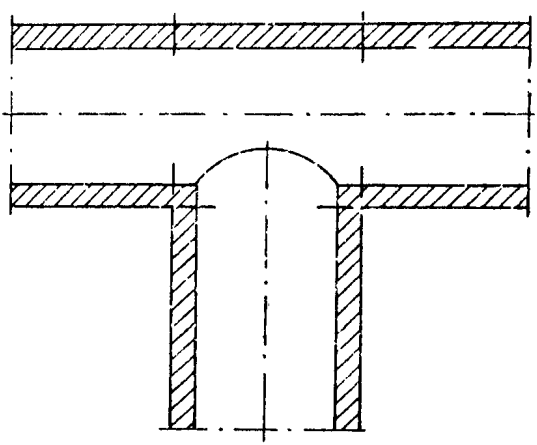
* Графики черт. 14 являются предварительными и подлежат корректировке.

Графики показателя ползучести m



Черт. 14

Расчетные сечения тройникового узла



Черт. 15

5.4. Определение напряжений на этапе III полного расчета

5.4.1. На этапе III полного расчета определяются эквивалентные максимальные условные напряжения цикла $\sigma^{э}_{у\,max}$ (размахи эквивалентных напряжений, соответствующие переходу трубопровода из холодного состояния в рабочее и обратно).

5.4.2. Для прямолинейных труб и криволинейных труб с $\lambda \geqslant 1{,}0$ применяется формула

$$\sigma^{э}_{у\,max} = \sqrt{0{,}75\sigma^{2}_{пр} + \sigma^{2}_{zMN} + 3\tau^{2}}. \qquad (10а)$$

Напряжения $\sigma_{пр}$, τ, σ_{zMN} вычисляются соответственно по формулам (5), (6), (7).

5.4.3. Для криволинейных труб (при любом значении λ) вычисления производятся по следующим формулам:

$$\left.\begin{aligned}
\sigma^{э}_{у\,max} &= \frac{1}{W}\sqrt{\left[(k_{н}{}^{*}M_{x} + 2M_{э})\right]\gamma_{m} + \left|k_{н}M_{y}\right|\beta_{m} + W\sigma_{пр}\right]^{2} + \cdots \rightarrow}\\
&\qquad \leftarrow \cdots \overline{+ (2k_{н}M_{z})^{2}};\\
\sigma^{э}_{у\,max} &= \frac{1}{W}\sqrt{\left[(k_{н}{}^{*}M_{x} + 2M_{э})\right]\beta_{m} + \left|k_{н}M_{y}\right|\gamma_{m} + W\sigma_{пр}\right]^{2} + \cdots \rightarrow}\\
&\qquad \leftarrow \cdots \overline{+ (2k_{н}M_{z})^{2}};\\
\sigma^{э}_{у\,max} &= \frac{1}{W}\sqrt{\left[(k_{н}{}^{*}M_{x} + 2M_{э})\right]\gamma_{m} + 2W\sigma_{пр}\right]^{2} + (2k_{н}M_{z})^{2}};\\
\sigma^{э}_{у\,max} &= \frac{1}{W}\sqrt{\left(\left|k_{н}M_{y}\right|\gamma_{m} + 2W\sigma_{пр}\right)^{2} + (2k_{н}M_{z})^{2}}.
\end{aligned}\right\} \qquad (10б)$$

Для оценки прочности принимается наибольшее из значений, получаемых по этим формулам.

При $M_{x} > 0$ (см. п. 5.3.3) и

$$\frac{|M_{э}|}{M_{x}} > \frac{1}{4}\left(k_{н} + \frac{1}{k_{н}}\right)$$

$k_{н}{}^{*} = \frac{1}{k_{н}}$; в остальных случаях $k_{н}{}^{*} = k_{н}$

Величины $M_{э}$, γ_{m}, β_{m}, $\sigma_{пр}$, $k_{н}$, W определяются так же, как при расчете по формулам (8).

5.4.4. Для двух поперечных сечений трубы, проходящих около кромки бокового отверстия, т. е. для тройникового узла (см. черт. 12), напряжение $\sigma^{э}_{у\,max}$ вычисляется по формуле:

$$\sigma^{э}_{у\,max} = \sqrt{\sigma^{2}_{пр}(0{,}4K_{0}^{2} - 0{,}3K_{0} + 0{,}25) + (k_{н}{}^{*}\sigma^{0}_{zMN})^{2} - \cdots \rightarrow}$$
$$\leftarrow \cdots \overline{- k_{н}{}^{*}\sigma_{пр}\sigma^{0}_{zMN}(0{,}6K_{0} - 1) + 3\tau^{2}}. \qquad (11)$$

Здесь K_{0} — коэффициент концентрации напряжений, определяемый по формуле:

$$K_{0} = 1{,}2\left[2 + 2\left(\frac{D_{н}}{D_{в}}\right)^{2} - \left(\frac{D_{н}}{D_{в}}\right)^{4}\right]$$

или по черт. 16 ($D_в$, $D_н$ — соответственно внутренний и наружный диаметры трубы).

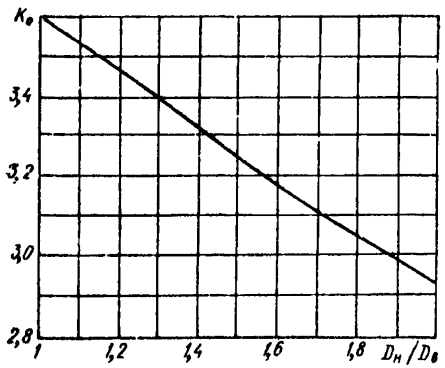
В том случае, когда $\sigma^0_{zMN} > 0$ и

$$\frac{\sigma^0_{zMN}}{\sigma_{пр}} < (0{,}6K_0 - 1)\frac{k_п}{k_п^2 + 1},$$

принимается $k_п^* = \frac{1}{k_п}$; в других случаях $k_п^* = k_п$.

Величины σ^0_{zMN}, $\sigma_{пр}$, $k_п$, τ определяются так же, как при расчете по формуле (9).

График коэффициента K_0



Черт. 16

Для равнопроходного или почти равнопроходного тройникового узла (отношение большего наружного диаметра к меньшему не более 1,1) производится также расчет для сечений всех трех участков, сходящихся в тройниковом узле (черт. 15), по формуле

$$\sigma^э_{у\,max} = \frac{1}{W}\sqrt{(k_п\gamma_m\sqrt{M_x^2 + M_y^2} + 2W\sigma_{пр})^2 + (2k_п M_z)^2}. \quad (12)$$

Определение входящих сюда величин выполняется так же, как при вычислении их по формуле (10).

5.5. **Определение напряжений на этапе IV полного расчета**

5.5.1. На этапе IV полного расчета определяются эквивалентные напряжения, соответствующие наиболее напряженным точкам сечений трубопровода.

5.5.2. Для прямолинейных труб и криволинейных труб с $\lambda \geqslant 1{,}0$ используется формула

$$\sigma_{экв} = \sqrt{\sigma^2_{zMN} + 3\tau^2}.$$

Значения τ и σ_{zMN} определяются по формулам (6) и (7).

5.5.3. Для криволинейных труб (при любом значении λ) вычисления производятся по формулам:

$$\sigma_{экв} = \frac{1}{W}\sqrt{[(k_н{}^{*}M_x + \chi_{э1}M_э)\gamma_m + |k_н M_y|\beta_m|^2 + (k_н M_z)^2};$$

$$\sigma_{экв} = \frac{1}{W}\sqrt{[(k_н{}^{*}M_x + \chi_{э1}M_э)\beta_m + |k_н M_y|\gamma_m|^2 + (k_н M_z)^2};$$

$$\sigma_{экв} = \frac{1}{W}\sqrt{[(k_н{}^{*}M_x + \chi_{э1}M_э)\gamma_m]^2 + (k_н M_z)^2};$$

$$\sigma_{экв} = \frac{1}{W}\sqrt{(k_н M_y\gamma_m)^2 + (k_н M_z)^2}.$$

Для оценки прочности берется большее из получаемых по этим формулам значений.

Коэффициент $\chi_{э1}$ определяется по формуле:

$$\chi_{э1} = -0{,}75\delta,$$

где δ — коэффициент, принимаемый по черт. 2.

В случае когда $M_x < 0$ и

$$\frac{M_э}{M_x} > -\frac{1}{2\chi_{э1}}\left(k_н + \frac{1}{k_н}\right),$$

принимается $k_н{}^{*} = \frac{1}{k_н}$; в противном случае $k_н{}^{*} = k_н$.

Величины, входящие в приведенные формулы, определяются так же, как при расчете по формулам (8) *.

5.5.4. Для двух поперечных сечений труб, проходящих около кромки бокового отверстия, т. е. для тройникового узла (см. черт. 12), эквивалентное напряжение вычисляется по формуле

$$\sigma_{экв} = \sqrt{\sigma_{пр}^2(K_{o1} - K_o)^2 + (k_н{}^{*}\sigma^0_{zMN})^2 - k_н{}^{*}\sigma^0_{zMN}\sigma_{пр}(K_{o1} - K_o) + 3\tau^2}.$$

Если $\sigma^0_{zMN} < 0$ и

$$\left|\frac{\sigma^0_{zMN}}{\sigma_{пр}}\right| < (K_o - K_{o1})\frac{k_н}{k_н{}^2 + 1},$$

то принимается $k_н{}^{*} = \frac{1}{k_н}$; в противном случае $k_н{}^{*} = k_н$.

Величины, входящие в приведенные формулы, определяются так же, как при расчете по формулам (9) и (11).

Для равнопроходного или почти равнопроходного тройникового узла (отношение большего наружного диаметра к меньшему не более 1,1) определяются также эквивалентные напряжения для сечений всех трех участков, сходящихся в тройниковом узле (см. черт. 15), по формуле

$$\sigma_{экв} = \frac{1}{W}\sqrt{(k_н\gamma_m\sqrt{M_x{}^2 + M_y{}^2}) + (k_н M_z)^2}. \qquad (13)$$

---

* $M_э$ определяется при рабочем давлении.

Определение входящих сюда величин выполняется так же, как при расчете их по формуле (10) (см. п. 5.7).

5.6. Коэффициенты интенсификации напряжений γ_m и β_m определяются по формулам:

$$\gamma_m = 0{,}75\lambda \sum_{l=2,4,\ldots}^{10} A_{l2}(1 - l^2);$$

$$\beta_m = k_p + 1{,}5 \sum_{l=2,4,\ldots}^{10} \frac{A_{l2}}{l},$$

причем коэффициенты A_{l2} вычисляются по следующим формулам:

$$A_{22} = -\frac{1}{b};$$

$$A_{42} = \frac{0{,}3125}{a_4} A_{22};$$

$$A_{62} = \frac{0{,}4375}{a_3} A_{42};$$

$$A_{82} = \frac{0{,}4687}{a_2} A_{62};$$

$$A_{10,2} = \frac{0{,}4812}{a_1} A_{82}.$$

Величины k_p, a_1, a_2, a_3, a_4, b определяются по формулам (1) и (2).

Коэффициенты γ_m и β_m можно принимать также по черт. 17 и 18.

При $0{,}3 \geqslant \lambda \geqslant 0{,}05$ и $\omega \leqslant 0{,}0003$ для подсчета коэффициента γ_m можно применять формулу:

$$\gamma_m = 1{,}89\lambda^{-\frac{2}{3}}. \qquad (14)$$

При $1 \geqslant \lambda \geqslant 0{,}05$ и $\omega \leqslant 0{,}0003$ для вычисления коэффициента β_m можно использовать формулу:

$$\beta_m = 1{,}13\lambda^{-\frac{2}{3}}. \qquad (15)$$

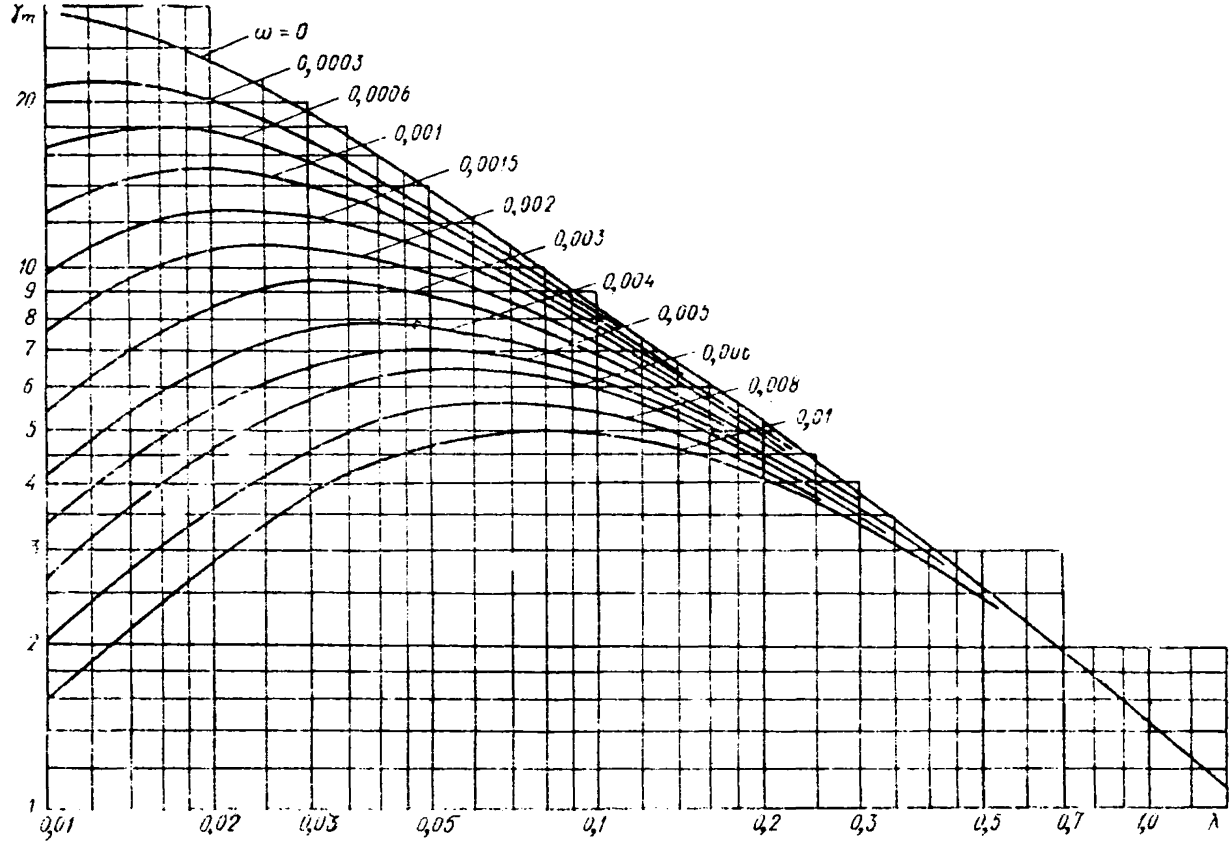
При $\lambda \geqslant 1{,}4$ принимается $\gamma_m = \beta_m = 1{,}0$.

Применение формул (14) и (15) при значениях λ и ω, выходящих за пределы указанных интервалов, дает значения γ_m и β_m со значительной ошибкой в сторону завышения.

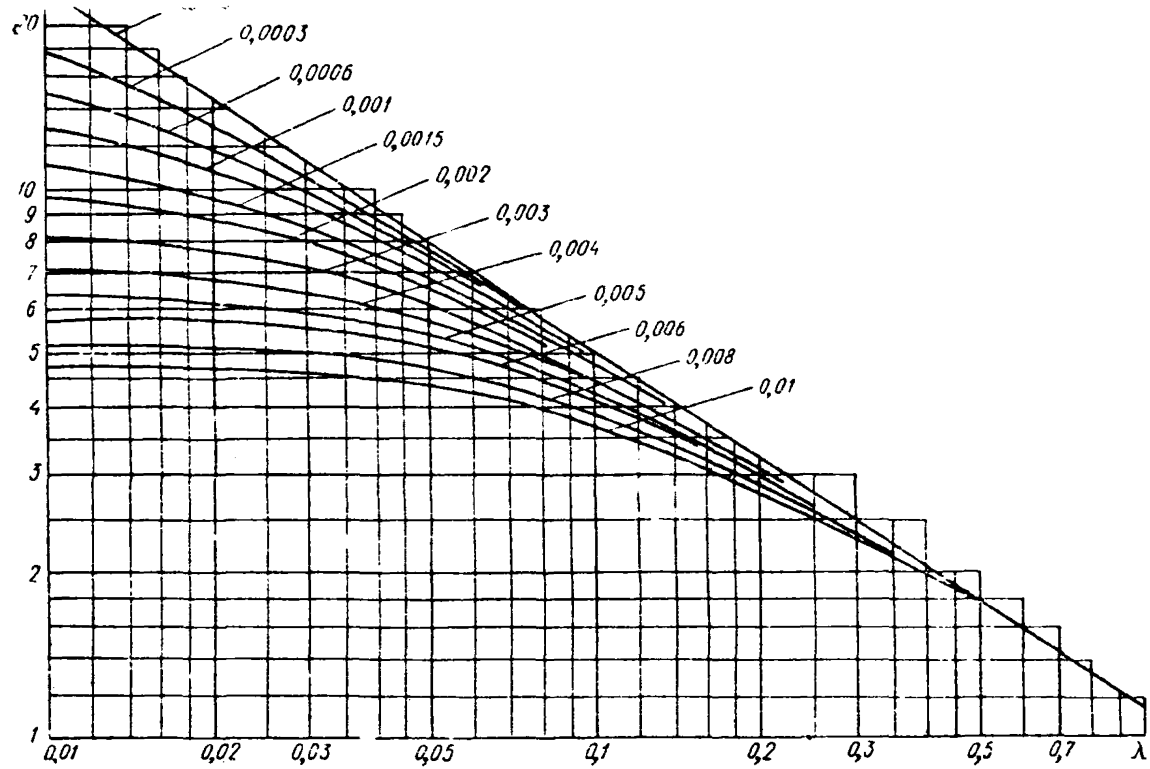
5.7. Для расчета трубопровода по этапу IV[а] коэффициенты γ_m и β_m должны определяться при $p = 0$.

5.8. В том случае, когда отсутствуют данные о фактической величине начальной эллиптичности сечений криволинейных труб,

Графики для определения коэффициента γ_m



Графики для определения коэффициента β_m



Чер.. 18

расчет напряжений в них по пп. 5.3.3, 5.4.3, 5.5.3 производится как при $a=0$, так и при возможном наибольшем значении a, принимаемом по техническим условиям на изготовление или по согласованию с заводом-изготовителем.

Если величина начальной эллиптичности $a \leqslant 3\%$, то в расчете напряжений эллиптичность не учитывается (в расчетных формулах принимается $a=0$)*.

5.9. Напряжения в секторных коленах с числом секторов более двух можно определять по приведенным формулам для криволинейных труб. При определении значения геометрического параметра λ для секторного колена величина радиуса R вычисляется по п. 4.10.

6. КРИТЕРИИ ПРОЧНОСТИ

6.1. Эффективные напряжения, вычисляемые на этапе I полного расчета трубопровода (пп. 5.2.1, 5.2.2, 5.2.3), должны удовлетворять для низкотемпературных трубопроводов условию

$$\sigma_{эф} \leqslant 1{,}5\sigma_{доп},$$

а для высокотемпературных трубопроводов условию

$$\sigma_{эф} \leqslant 1{,}2\sigma_{доп}.$$

Напряжение $\sigma_{доп}$ определяется по п. 6.4 в зависимости от рабочей температуры $t_р$ соответствующего участка трубопровода.

6.2. Эквивалентные напряжения, вычисляемые на этапах II и IV полного расчета (подразделы 5.3, 5.5), должны удовлетворять условиям:

— для прямолинейных труб и криволинейных труб с $\lambda \geqslant 1{,}0$ (расчет по пп. 5.3.2, 5.5.2)

$$\sigma_{экв} < 1{,}5\sigma_{доп};$$

— для криволинейных труб, секторных колен (расчет по пп. 5.3.3, 5.5.3) и для тройниковых узлов при расчете по формулам (10), (13)

$$\sigma_{экв} \leqslant 2{,}5\sigma_{доп};$$

— для тройниковых узлов при расчете по пп. 5.3.4, 5.5.4

$$\sigma_{экв} \leqslant 1{,}8\sigma_{доп}.$$

Величина $\sigma_{доп}$ принимается по п. 6.4 в зависимости от соответствующей температуры участка трубопровода ($t_р$ — для расчета по этапу II и $t_к$ — для расчета по этапу IV).

---

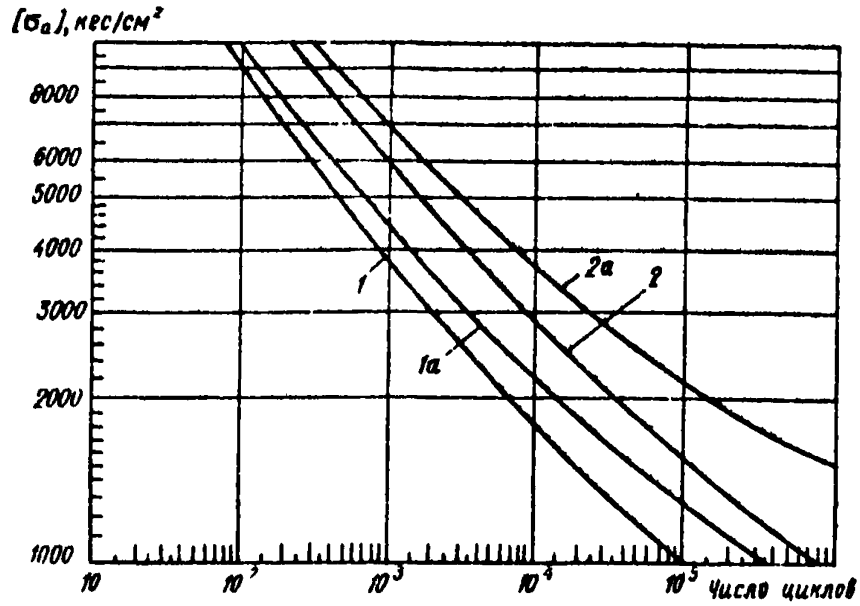
* Если толщина стенки криволинейной трубы включает прибавку, определяемую по рекомендациям по определению прибавки к расчетной толщине стенки гнутых труб (1972 г.), дополняющим «Нормы расчета элементов паровых котлов на прочность», то учет эллиптичности сечения по настоящему РТМ необязателен.

6.3. Эквивалентные максимальные условные напряжения, вычисляемые на этапе III полного расчета (подраздел 5.4), должны удовлетворять условию

$$\frac{1}{2}\sigma^{э}_{у\,max} \leqslant [\sigma_a].$$

Значение допустимой амплитуды напряжения $[\sigma_a]$ принимается по черт. 19 в зависимости от числа циклов нагружения (пусков) трубопровода за весь период эксплуатации *.

Графики допустимых амплитуд напряжений для элементов трубопровода



1 — для прямолинейных труб, криволинейных труб и секторных колен (при расчете $\sigma^{э}_{у\,max}$ по формуле (10а)) и тройниковых узлов (при расчете $\sigma^{э}_{у\,max}$ по формуле (11)) из углеродистой или легированной (не аустенитной) стали при рабочей температуре до 370° С; *1а* — для тех же элементов из аустенитной стали при рабочей температуре до 450° С; *2* — для криволинейных труб, секторных колен (при расчете $\sigma^{э}_{у\,max}$ по формулам (10б)) и тройниковых узлов (при расчете $\sigma^{э}_{у\,max}$ по формуле (12)) из углеродистой или легированной (не аустенитной) стали при рабочей температуре до 370° С; *2а* — для тех же элементов из аустенитной стали при рабочей температуре до 450° С

Черт. 19

Для трубопроводов с рабочей температурой 150—250° С число циклов нагружения следует принимать с запасом (с превышением

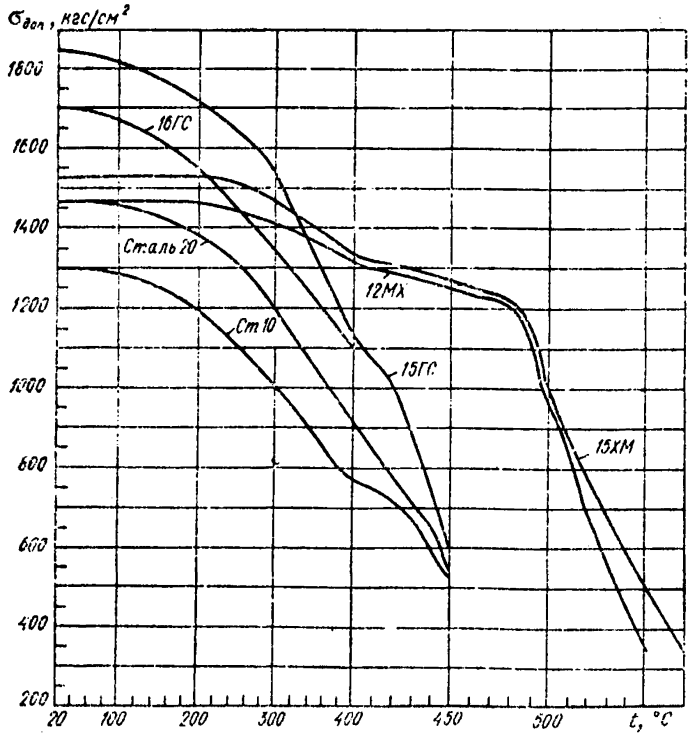
---

* Под циклом нагружения трубопровода понимается периодически повторяющийся режим его работы, включающий нагрев, эксплуатацию при постоянной температуре и отключение с полным охлаждением. Следовательно, количество циклов нагружения трубопровода равно числу включений его в работу из холодного состояния или числу отключений его на длительное время

над ожидаемым действительным значением) не менее 50%, а при более высокой температуре — с запасом не менее 100%. Если наружный диаметр трубопровода бо. ьше 500 *мм*, то расчетное число циклов нагружения для него рекомендуется принимать с добавочным увеличением, составляющим 50% действительного числа циклов (для трубопроводов с любой рабочей температурой). Если расчетное число циклов нагружения трубопровода меньше 3000, то принимается значение $[\sigma_a]$ при 3000 циклах.

6.4. Допускаемое напряжение $\sigma_{доп}$ принимается по скорректированным таблицам «Норм расчета элементов паровых котлов на

Графики допускаемых напряжений для трубных сталей



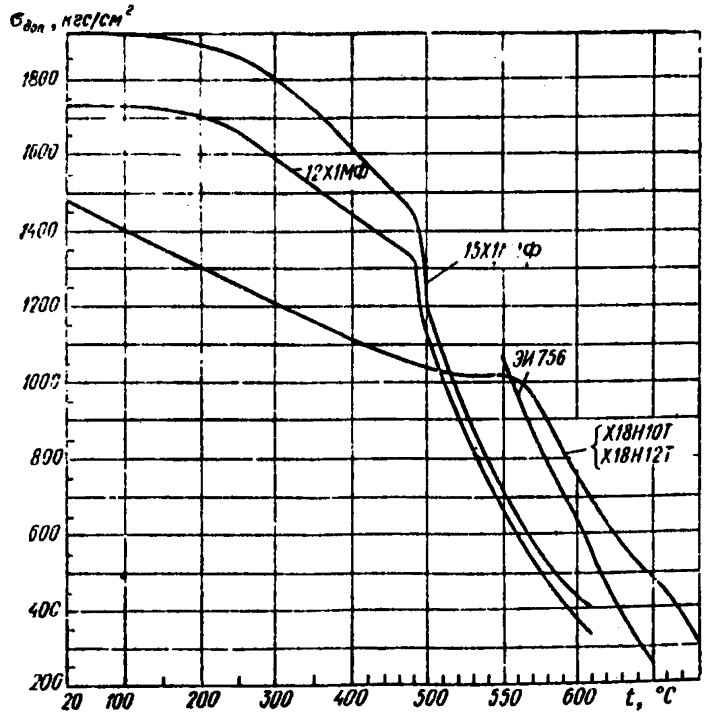
Черт. 20

прочность» [2] (см. табл. 5 и 6). Для промежуточных значений температуры металла трубопровода значение $\sigma_{доп}$ определяется по способу линейной интерполяции. Значение $\sigma_{доп}$ можно определять также по черт. 20 и 21 (не рекомендуется использовать эти гра-

фики при расчете элементов трубопровода на одно внутреннее давление).

Для элементов трубопровода, изготовленных литьем (литые колена, литые тройники), значение $\sigma_{доп}$ принимается по табл. 5 и 6 или по графикам черт. 20 и 21 с уменьшением на 30%.

Графики допускаемых напряжений для трубных сталей



Черт. 21

Таблица 5

Допускаемые напряжения $\sigma_{доп}$ для углеродистых и низколегированных марганцовистых сталей, кгс/см²

Температура стенки, °С	Марки стали					
	Ст2	Ст10	Ст3	20	16ГС (3Н)	15ГС
20	1300	1300	1400	1470	1700	1850
250	1090	1120	1200	1320	1450	1650
275	1030	1060	1140	1260	1400	1610
300	980	1000	1080	1190	1340	1530
320	—	950	—	1140	1300	1450
340	—	960	—	1090	1250	1360
370	—	850	—	1030	1200	1290
380	—	810	—	970	1150	1210
400	—	770	—	920	1100	1130
410	—	750	—	850	—	1070
420	—	720	—	780	—	1020

Продолжение табл. 5

Температура стенки, °С	Марки стали					
	Ст2	Ст10	Ст3	20	16ГС (ЗН)	
430	—	680	—	720	—	
440	—	600	—	660	—	
450	—	530	—	530	—	
460	—	—	—	430	—	470

Таблица 6

Допускаемые напряжения $\sigma_{доп}$ для теплостойких легированных сталей, *кгс/с*.

Температура стенки, °С	Марки стали					
	12МХ	15ХМ	12Х1МФ	15Х11МФ	1Х12В2МФ (ЭИ756)	Х18Н10Т Х18Н12Т
20	1470	1530	1730	1920	2000	1470
250	1450	1520	1660	1860	—	1250
300	1410	1470	1590	1800	—	1200
350	1370	1400	1520	1720	—	1160
400	1320	1330	1450	1620	—	1110
420	1290	1310	1420	1580	—	1100
440	1260	1280	1390	1540	—	1080
460	1230	1250	1360	1500	—	1060
480	1210	1220	1330	1450	—	1050
500	960	990	1130	1200	—	1040
510	830	—	1010	1070	—	1030
520	690	—	900	960	—	1030
530	570	—	810	860	—	1020
540	470	—	730	780	—	1000
550	—	—	660	710	1070	1010
560	—	—	590	640	970	1010
570	—	—	530	570	870	970
580	—	—	470	520	780	900
590	—	—	410	470	700	810
600	—	—	370	430	620	740
610		—	330	400	540	680
620	—	—	—	—	450	620
630	—	—	—	—	380	570
640	—	—	—	—	310	520
650	—	—	—	—	260	480
660	—	—	—	—	—	430
670	—	—	—	—	—	390
680	—	—	—	—	—	320

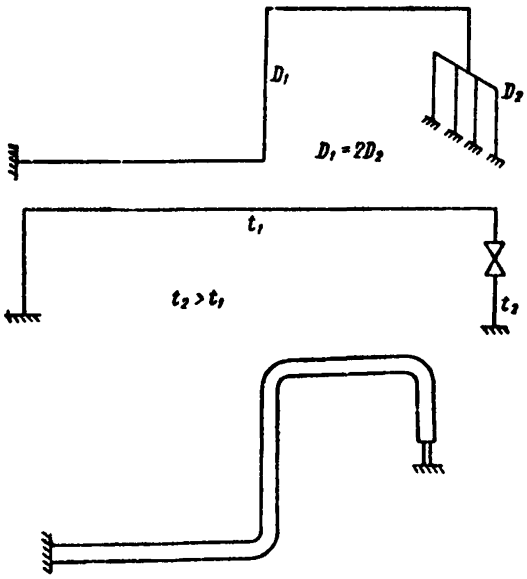
7. ПРИМЕНЕНИЕ И ЧЕТ МОНТАЖНОЙ РАСТЯЖКИ

7.1. В высокотемпературных трубопроводах монтажная (холодная) растяжка применяется для повышения их прочности и уменьшения передаваемых усилий на оборудование в рабочем состоянии, а в низкотемпературных трубопроводах — для уменьшения нагрузки на оборудование в рабочем состоянии.

7.2. Применять монтажную растяжку не обязательно. Вопрос о целесообразности ее применения, а также о ее величине и месте выполнения следует решать с учетом конкретных особенностей трубопровода.

7.3. Рекомендуется применять монтажную растяжку в высокотемпературных трубопроводах, обладающих локализаторами ползучести, т. е. элементами, в которых может происходить интенсивное накопление деформации ползучести. Примеры таких трубопроводов приведены на черт. 22.

Примеры трубопроводов, имеющих локализаторы ползучести



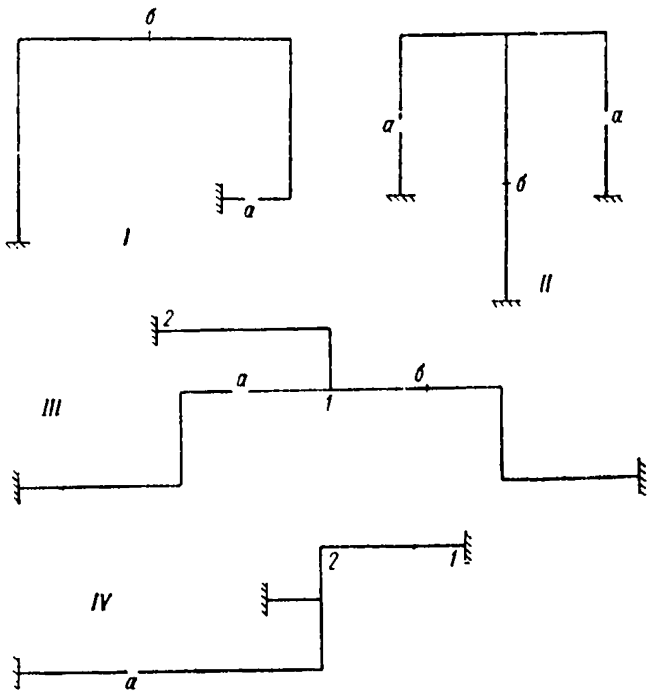
Черт. 22

7.4. Возможны случаи, когда монтажная растяжка дает отрицательный эффект. Так, в трубопроводах I и II (см. черт. 23) выполнение монтажной растяжки в сечении *а* увеличивает усилия и напряжения в трубопроводе в рабочем (горячем) состоянии. Если монтажная растяжка выполняется в сечении *б* этих трубопроводов, то достигается положительный эффект. В трубопроводах III и IV (см. черт. 23) выполнение монтажной растяжки в сечении *а* увеличивает усилия и напряжения на участке 1—2. Перенос места

выполнения монтажной растяжки в трубопроводе III в сечение *б* исключает перегрузку участка 1—2.

7.5. Рекомендуется назначать величину монтажной растяжки: в низкотемпературных трубопроводах — не более 60% от воспринимаемого (компенсируемого) температурного расширения, а

Примеры неправильного выбора места выполнения монтажной растяжки



Черт. 23

в высокотемпературных трубопроводах — не более 100δ%, где δ — коэффициент, представленный графически на черт. 2.

7.6. Учет монтажной растяжки в расчете трубопровода допускается лишь в том случае, когда гарантируется выполнение ее в строгом соответствии с данными проекта. Для низкотемпературного трубопровода монтажная растяжка учитывается на этапах II и IV полного расчета, а для высокотемпературного трубопровода — только на этапе II (исключение см. п. 7.9).

7.7. При применении монтажной растяжки с негарантируемым качеством выполнения рекомендуется производить расчет трубопровода без учета монтажной растяжки (ее положительный эффект относим к неучитываемым факторам, повышающим запас надежности). При этом требуется, однако, обосновать положительное значение применяемой монтажной растяжки.

7.8. Учет монтажной растяжки в расчете высокотемпературного трубопровода по этапу II допускается только при определении передаваемой нагрузки на оборудование. В этом случае расчет должен выполняться в двух вариантах: а) с учетом монтажной растяжки и при введении действительной температуры нагрева $t_н$ (расчет для определения усилий воздействия на оборудование); б) без учета монтажной растяжки и при введении фиктивной температуры нагрева $t_{р.ф}$ согласно п. 2.6 (расчет для оценки прочности трубопровода). При этом требуется обосновать благоприятное воздействие монтажной растяжки на напряженное состояние трубопровода в рабочем состоянии.

7.9. Если для высокотемпературного трубопровода величина монтажной растяжки превышает величину, указанную в п. 7.5, то необходимо (независимо от качества выполнения монтажной растяжки) выполнить дополнительный расчет трубопровода по этапу IV с учетом монтажной растяжки, но без учета саморастяжки (т. е. при тех же расчетных условиях, которые принимаются при выполнении расчета низкотемпературного трубопровода по этапу IV).

7.10. Усилия воздействия низкотемпературного трубопровода на оборудование в холодном состоянии можно определять по формуле п. 3.3 и при учете монтажной растяжки.

7.11. Учет монтажной растяжки в расчете трубопровода производится путем введения соответствующих взаимных смещений стыкуемых сечений (т. е. смещений стыкуемых сечений при выполнении растяжки).

Рекомендуемое

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМ

1. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

1.1. Излагаемый алгоритм расчета трубопроводных систем основывается на специальном методе раскрытия статической неопределимости, а именно на методе прогонки в сочетании с методом перемещений и методом начальных параметров [3]. Его преимущества — простая логическая схема и высокая вычислительная надежность (т. е. слабая чувствительность к погрешности округления).

1.2. Алгоритм излагается применительно к одному (любому) этапу полного расчета трубопроводной системы. При этом используется матричный аппарат, что делает алгоритм удобным для программирования. Применяются квадратные матрицы 6×6 и 3×3 и матрицы-столбцы (векторы) 6×1.

1.3. Учитываются промежуточные упругие опоры (пружинные подвески). В практических расчетах трубопроводов по данному алгоритму опоры скольжения можно учитывать по способу замены их упругими опорами очень большой жесткости, а направляющие опоры — по способу замены их эквивалентными ответвлениями [3].

1.4. Излагаемый алгоритм реализован в программах полного расчета сложных трубопроводных систем для ЭЦВМ «Минск-22» и «БЭСМ-4».

2. ТЕРМИНОЛОГИЯ. НЕКОТОРЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

2.1. Под трубопроводной системой понимается разветвленный трубопровод, концы которого защемлены (черт. 1 настоящего приложения).

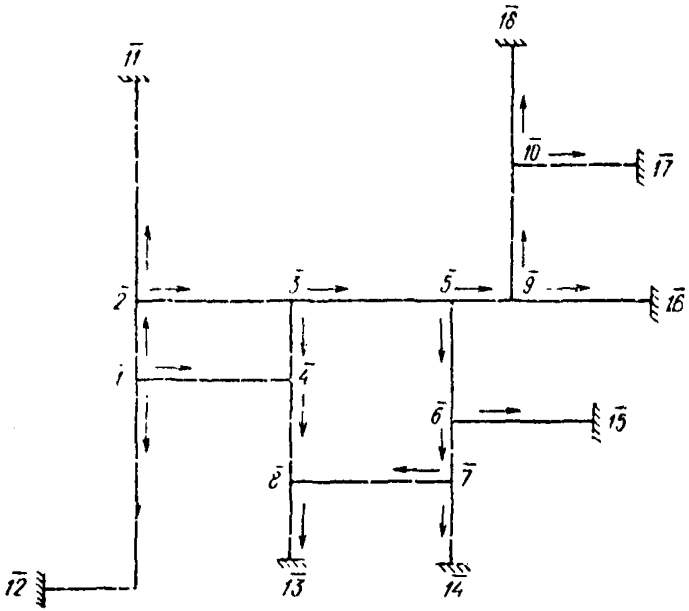
2.2. Точки, в которых линия трубопровода разветвляется, называются узловыми (узлами).

2.3. Участок — часть линии трубопроводной системы, заключенная между двумя смежными узлами или между концевой защемляющей опорой и прилежащим узлом. Участки делятся на промежуточные и концевые. Концевым называется участок, один конец которого защемлен.

2.4. Каждый участок состоит из отрезков (прямолинейных, криволинейных). Границами отрезков являются: точка сопряжения прямолинейной трубы с криволинейной; место приложения внешней сосредоточенной нагрузки; место установки промежуточной опоры; точка сопряжения труб, имеющих различные размеры поперечного сечения, сечение, где требуется определить напряжения или перемещения (черт. 2 настоящего приложения).

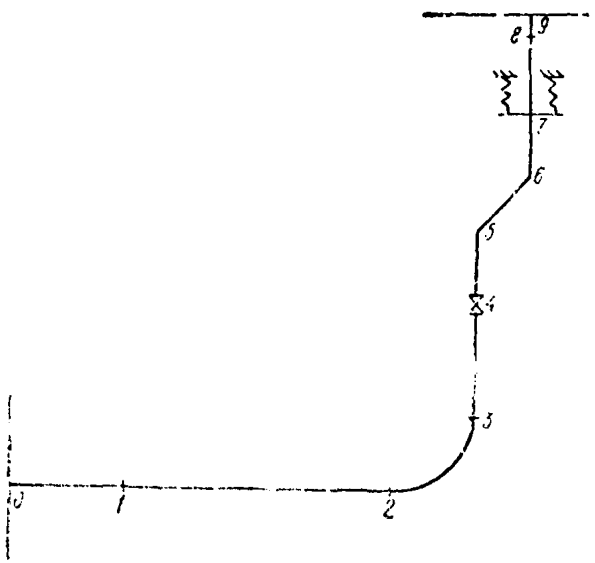
2.5. Пролет — часть участка трубопроводной системы, заключенная между двумя смежными промежуточными опорами или

Трубопроводная система



Черт. 1

Деление участка на отрезки



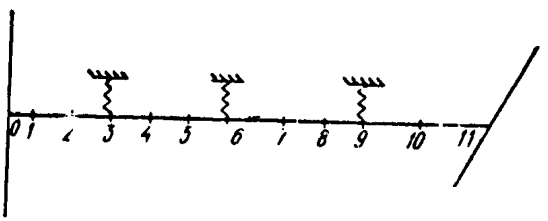
Черт. 2

узлом и ближайшей промежуточной опорой. Так, части *0—3*, *3—6*, *6—9*, *9—11* — пролеты участка, показанного на черт. 3 настоящего приложения.

2.6. Узлы нумеруются: $\overline{1}$, $\overline{2}$, $\overline{3}$, ..., $\overline{N}$ (черт. 1 настоящего приложения), причем последовательность нумерации может быть любой. Защемленные концы трубопроводной системы обозначаются (в любом порядке): $\overline{N+1}$, $\overline{N+2}$, ...

2.7. Точки деления участка на отрезки обозначаются числами (см. черт. 2 настоящего приложения): *0*, *1*, *2*, ..., *n*. Отрезок обозначается числом, отмечающим его конечную точку (для отрезка i — $(i+1)$ конечной точкой является $i+1$).

Деление участка на пролеты



Черт. 3

2.8. Участок обозначается двумя числами с чертой наверху, отмечающими его концы. Так, участки трубопроводной системы, показанной на черт. 1 настоящего приложения, обозначаются: $\overline{1}$—$\overline{2}$, $\overline{1}$—$\overline{12}$, $\overline{1}$—$\overline{4}$ и т. д. Первое число соответствует концу участка, от которого ведется нумерация точек деления на отрезки (начальное сечение участка). Это число должно быть меньше числа, отмечающего конечное сечение участка (направление нумерации точек деления участков на отрезки обозначено на черт. 1 настоящего приложения стрелками).

3. КООРДИНАТНЫЕ СИСТЕМЫ

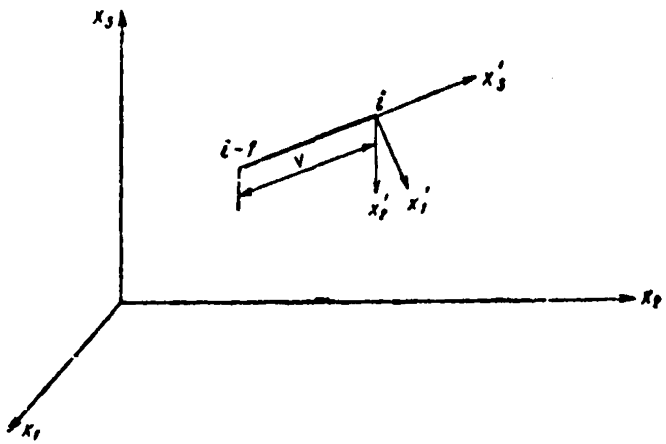
3.1. Используются правосторонние общая и местная ортогональные координатные системы. В общей координатной системе ($x_1x_2x_3$) определяются координаты точек деления участков на отрезки. Местная система координат ($x_1'x_2'x_3'$) используется при учете монтажной растяжки и при определении положения бокового отверстия в трубе.

3.2. Начало общей координатной системы может находиться в принципе в любой точке пространства. Ось x_3 направляется вертикально вверх.

3.3. Начало местной координатной системы располагается в конечной точке отрезка.

В прямолинейном отрезке (черт. 4 настоящего приложения) ось x_3' направляется вдоль отрезка в сторону от сечения $i-1$ к сечению i; ось x_1' располагается параллельно плоскости x_1x_2, и

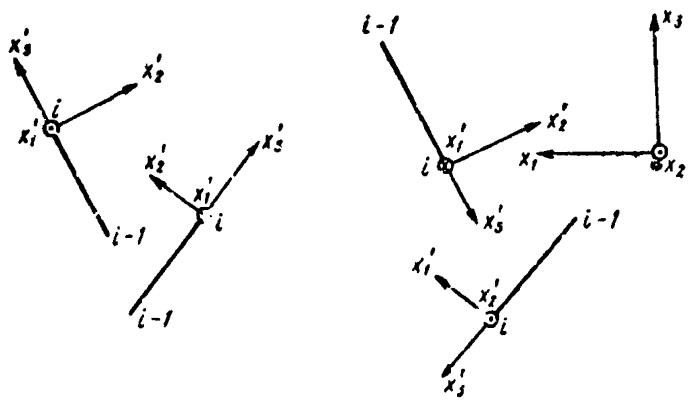
Общий случай расположения прямолинейного отрезка



Черт. 4

направление ее выбирается в такую сторону, чтобы косинус угла между этой осью и осью x_1 общей системы был положительным.

Отрезок параллелен плоскости x_1x_3 (перпендикулярен оси x_2, но не перпендикулярен плоскости x_1x_2)



Черт. 5

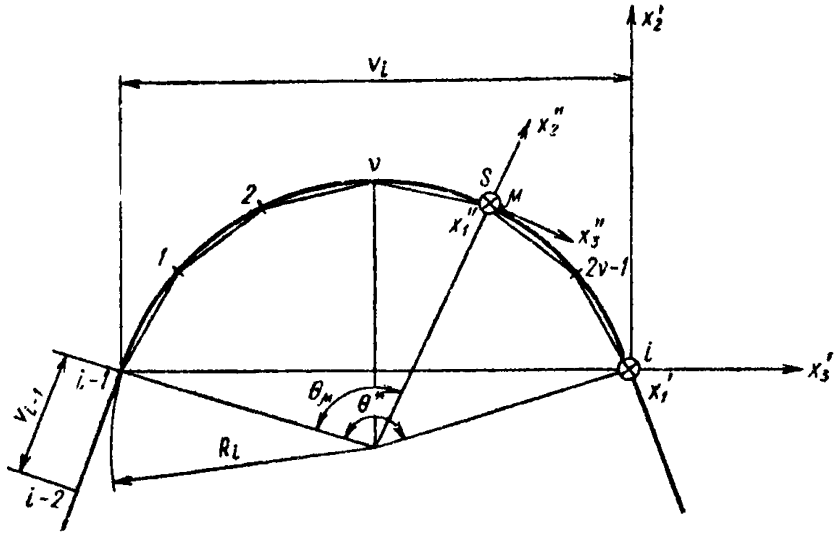
Размещение местной координатной системы в частном случае расположения прямолинейного отрезка показано на черт. 5 настоящего приложения.

Размещение местной координатной системы криволинейного отрезка показано на черт. 6 настоящего приложения. Ось x_3' направляется по хорде в сторону от сечения $i-1$ к сечению i; ось x_2' лежит в плоскости криволинейного отрезка и направлена перпендикулярно к хорде в сторону выпуклости отрезка.

3.4. В дальнейшем буквенные обозначения величин, отнесенных к местной координатной системе $ix_1'x_2'x_3'$, снабжаются штрихом.

3.5. Будет использоваться также правосторонняя ортогональная подвижная координатная система $Sx_1''x_2''x_3''$ с началом в текущей точке S оси трубопровода. В криволинейном отрезке

Криволинейный отрезок



Черт. 6

(черт. 6 настоящего приложения) ось x_3'' направлена по касательной в сторону от сечения $i-1$ к сечению i, ось x_2'' — по радиусу в сторону выпуклости отрезка.

В прямолинейном отрезке направления осей x_1'', x_2'', x_3'' совпадают с направлениями осей x_1', x_2', x_3' соответственно.

3.6. Буквенные обозначения величин, отнесенных к подвижной координатной системе, дополняются двумя штрихами.

4. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ТРУБОПРОВОДА

4.1. Для промежуточных сечений каждого участка задаются следующие данные:

— координаты x_1, x_2, x_3 (в *см*) центра поперечного сечения для каждой точки $0, 1, 2, \ldots, n$ деления на отрезки в общей координатной системе $x_1x_2x_3$;

— радиус кривизны центральной оси R (в *см*) (для каждого криволинейного отрезка).

— проекции P_1, P_2, P_3 (в *кг*) на оси x_1, x_2, x_3 вектора сосредоточенной силы (для некоторых промежуточных сечений).

— жесткость k (в *кгс/см*) промежуточной упругой опоры (для некоторых промежуточных сечений).

— проекции δ_1', δ_2', δ_3' (в *см*) на оси местной системы координат $ix_1'x_2'x_3'$ вектора поступательного перемещения начального сечения $(i+1)$-го отрезка относительно конечного сечения i-го отрезка, возникающего при выполнении монтажной растяжки в сечении i (для одной точки, не совпадающей с концом пролета).

4.2. Для каждого участка в целом задаются:

— внутреннее избыточное давление p (в *кгс/см*^{2});

— коэффициент линейного расширения β (в 1/°C);

— интенсивности распределенной нагрузки q_1, q_2, q_3 (в *кг/см*) по осям x_1, x_2, x_3;

— температура нагрева $t_н$ (в °C);

— наружный диаметр $D_н$ (в *см*);

— толщина стенки s (в *см*) (для некоторых отрезков значения $D_н$, s могут отличаться от значений для всего участка);

— модуль упругости E (в *кгс/см*^{2});

— проекции u_1, u_2, u_3 (в *см*) вектора поступательного перемещения защемленного конца.

5. РАСЧЕТ ОТРЕЗКОВ

5.1. Матрица поворота для прямолинейного отрезка. Исходные данные: координаты концов $i-1$, i отрезка в системе $x_1x_2x_3$ (см. черт. 4 настоящего приложения).

Матрица поворота

$$\alpha_i = \alpha_{2i} \cdot \alpha_{1i}, \tag{1}$$

где

$$\alpha_{1i} = \begin{Vmatrix} \cos\hat{x}_3 & \sin\hat{x}_3 & 0 \\ -\sin\hat{x}_3 & \cos\hat{x}_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Vmatrix}; \tag{2}$$

$$\alpha_{2i} = \begin{Vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\hat{\xi}_1 & \sin\hat{\xi}_1 \\ 0 & -\sin\hat{\xi}_1 & \cos\hat{\xi}_1 \end{Vmatrix}. \tag{3}$$

Здесь в обозначениях углов, а ниже в обозначениях и других величин индекс i, отмечающий номер отрезка, для сокращения записи опущен.

В приведенных формулах

$$\cos \hat{x}_3 = \left| \frac{r_2}{\sqrt{r_1^2 + r_2^2}} \right|;$$

$$\sin \hat{x}_3 = \pm \left| \frac{r_1}{\sqrt{r_1^2 + r_2^2}} \right|;$$

$$\cos \hat{\xi}_1 = \frac{r_3}{v};$$

$$\sin \hat{\xi}_1 = -\frac{1}{v}(-r_1 \sin \hat{x}_3 + r_2 \cos \hat{x}_3),$$

где

$$r_j = x_j^{(i)} - x_j^{(i-1)}, \ (j = 1, 2, 3);$$

$$v = \sqrt{\sum_{j=1}^{3} r_j^2}. \qquad (4)$$

В формуле для $\sin \hat{x}_3$ берется знак «плюс», если r_1 и r_2 имеют разные знаки, и знак «минус», если r_1 и r_2 имеют одинаковые знаки.

При $r_1 = r_2 = 0$ принимается $\cos \hat{x}_3 = 1$, $\sin \hat{x}_3 = 0$, а при $r_1 \neq 0$, $r_2 = 0$ вычисления $\sin \hat{x}_3$ и $\cos \hat{x}_3$ следует производить по общим формулам, приписывая значению $r_2 = 0$ знак «минус».

5.2. Матрица поворота для криволинейного трезка. Исходные данные: координаты концов $i-1, i$ криволинейного отрезка и конца $i-2$ предшествующего прямолинейного отрезка в координатной системе $x_1 x_2 x_3$; радиус кривизны R_i (см. черт. 6 настоящего приложения).

Искомая матрица поворота

$$\alpha_i = \alpha_{3i} \alpha_{2i} \alpha_{1i}. \qquad (5)$$

Матрицы α_{1i}, α_{2i} определяются по формулам прямолинейного отрезка (2), (3), а

$$\alpha_{3i} = \begin{Vmatrix} \cos \hat{\eta}_3 & \sin \hat{\eta}_3 & 0 \\ -\sin \hat{\eta}_3 & \cos \hat{\eta}_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Vmatrix},$$

где

$$\cos \hat{\eta}_3 = \frac{1}{v_{i-1} \sin \frac{\varphi_i}{2}} [(-r_1 \sin \hat{x}_3 + r_2 \cos \hat{x}_3) \cos \hat{\xi}_1 + r_3 \sin \hat{\xi}_1];$$

$$\sin\hat{\gamma}_{i3} = -\frac{1}{v_{i-1}\sin\frac{\theta_i^*}{2}}(r_1\cos\hat{x}_3 + r_2\sin\hat{x}_3).$$

Здесь

$$r_j = x_j^{(i-1)} - x_j^{(i-2)}, \quad (j = 1, 2, 3);$$

$$v_{i-1} = \sqrt{\sum_{j=1}^{3} r_j^2};$$

$$\sin\frac{\theta_i^*}{2} = \frac{v_i}{2R_i}, \quad \left(v_i = \sqrt{\sum_{j=1}^{3}(x_j^{(i)} - x_j^{(i-1)})^2}\right),$$

где θ_i^* — угол между крайними сечениями криволинейного отрезка.

5.3. Определение координат точек излома вписанной ломаной, заменяющей криволинейный отрезок. Исходные данные: координаты концов $i-2, i-1, i$ отрезков в координатной системе $x_1x_2x_3$; радиус кривизны R_i (см. черт. 6 настоящего приложения).

Координаты точек μ ($\mu = 1, 2, \ldots, 2\nu - 1$) излома вписанной ломаной в системе $x_1x_2x_3$ равны

$$\begin{Vmatrix} x_1^{(\mu)} \\ x_2^{(\mu)} \\ x_3^{(\mu)} \end{Vmatrix} = \begin{Vmatrix} x_1^{(i)} \\ x_2^{(i)} \\ x_3^{(i)} \end{Vmatrix} + \tilde{\alpha}_i R_i \begin{Vmatrix} 0 \\ \cos\left(\theta_\mu - \frac{\theta_i^*}{2}\right) - \cos\frac{\theta_i^*}{2} \\ \sin\left(\theta_\mu - \frac{\theta_i^*}{2}\right) - \sin\frac{\theta_i^*}{2} \end{Vmatrix}.$$

Здесь $\tilde{\alpha}_i$ — матрица, транспонированная по отношению к матрице α_i, вычисляемой для данного криволинейного отрезка по формуле (5).

Угол $\frac{\theta_i^*}{2}$ вычисляется из соотношения

$$\sin\frac{\theta_i^*}{2} = \frac{v_i}{2R_i},$$

используемого при определении матрицы α_i.

Угол θ_μ равен

$$\theta_\mu = \frac{\theta_i^*}{2\nu}\nu; \quad (\nu = 1, 2, \ldots, 2\nu - 1).$$

5.4. Матрица податливости для конечной точки отрезка. Исходные данные: координаты в координатной системе $x_1x_2x_3$ концов отрезка (для криволинейного отрезка — координаты концов отрезка вписанной ломаной); модуль упругости E; наружный диаметр трубы $D_н$; толщина стенки трубы s.

Искомая матрица

$$a_i = \tilde{D}_i a_i' D_i,$$

где D_i — матрица 6×6, равная

$$D_i = \begin{Vmatrix} a_i & 0_3 \\ 0_3 & a_i \end{Vmatrix};$$

$\tilde{D}_i$ — матрица, транспонированная по отношению к матрице D_i;
0_3 — нулевая матрица 3×3;

$$a_i' = \begin{Vmatrix} F_1' + F_2' & F_3' \\ F_4' & F_5' \end{Vmatrix}.$$

Здесь a_i — матрица поворота, вычисляемая по формуле (1);

$$F_1' = Av;$$

$$F_2' = \frac{1}{3} v^3 \frac{k_p^*}{EJ_э} w_1;$$

$$F_3' = \frac{1}{2} v^2 \frac{k_p^*}{EJ_э} w_2;$$

$$F_4' = -\frac{1}{2} v^2 \frac{k_p^*}{EJ_э} w_2;$$

$$F_5' = Bv,$$

где

$$w_1 = \begin{Vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix}; \quad w_2 = \begin{Vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix}; \tag{6}$$

$$A = \begin{Vmatrix} \frac{2}{Gl} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{GF} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{EF} \end{Vmatrix}; \quad B = \begin{Vmatrix} \frac{k_p^*}{EJ_э} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_p^*}{EJ_э} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{GJ_p} \end{Vmatrix}, \tag{7}$$

причем

$$\left.\begin{aligned} F &= \pi s (D_н - s), \\ J_э &= \frac{\pi D_н^4}{64}\left[1 - \left(\frac{D_н - 2s}{D_н}\right)^4\right]; \\ J_p &= 2J_э; \\ G &= \frac{E}{2{,}6}. \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

Формулы пригодны как для прямолинейных отрезков, так и для отрезков ломаной, заменяющей криволинейный отрезок; разница только в том, что в первом случае $k_p^* = 1$.

Определение коэффициента k_p^* описано в разд. 4 РТМ.

Длина отрезка v вычисляется по формуле (4).

Примечание. Применительно к криволинейному отрезку расчет ведется для заменяющих прямолинейных отрезков, причем все исходные значения, кроме координат, соответствуют исходным значениям для криволинейного отрезка в целом. Матрица D_i вычисляется для заменяющего отрезка, т. е. по координатам концов этого отрезка.

5.5. Матрица перемещений начального сечения отрезка от распределенных воздействий и монтажной растяжки. Исходные данные: координаты в системе $x_1x_2x_3$ концов отрезка i (для криволинейного отрезка — координаты концов отрезка вписанной ломаной); температура нагрева $t_н$; значения перемещений данного сечения i от монтажной растяжки; значение интенсивности распределенной нагрузки; коэффициент линейного расширения β; значения E, G, $D_н$, s для отрезка i.

Примечание. Применительно к криволинейному отрезку расчет ведется для заменяющих прямолинейных отрезков, причем все исходные значения, кроме координат, соответствуют исходным значениям для криволинейного отрезка в целом.

Искомая матрица перемещений (сечения i отрезка $i+1$)

$$\Delta_i = \tilde{D}_i(\Delta'_{iq} + \Delta'_{it} + \delta_i').$$

Здесь

$$\Delta'_{iq} = \begin{Vmatrix} \overline{F}_1' + \overline{F}_2' & 0_3 \\ \overline{F}_4' & 0_3 \end{Vmatrix} D_i q,$$

где q — интенсивность распределенной нагрузки;

$$\overline{F}_1' = \frac{1}{2} A v^2;$$

$$\overline{F}_2' = \frac{1}{8} v^4 \frac{k_p^*}{EJ_3} w_1;$$

$$\overline{F}_4' = -\frac{1}{6} v^3 \frac{k_p^*}{EJ_3} w_2.$$

Значения w_1, w_2, A, F, J_3 выражаются формулами (6), (7), (8).

Для прямолинейных отрезков, не заменяющих криволинейные, $k_p^* = 1$.

Матрица-столбец q имеет вид:

$$q = |\times\times\times 000|,$$

где $\times$ — элементы, значения которых задаются.

Матрицы-столбцы Δ'_{it} и δ_i' равны:

$$\Delta'_{it} = \beta t_н v |0\,0\,1\,0\,0\,0|;$$

$$\delta_i' = |\times\ \times\ \times\ 0\ 0\ 0|.$$

Матрица D_i равна

$$D_i = \left\| \begin{matrix} \alpha_i & 0 \\ 0 & \alpha_i \end{matrix} \right\|,$$

где α_i — матрица поворота, вычисляемая по формуле (1).

5.6. Матрица внутренних сил, вызываемых распределенной нагрузкой. Исходные данные: координаты в системе $x_1x_2x_3$ концов отрезка (для криволинейного отрезка — координаты концов отрезка вписанной ломаной); значение интенсивности распределенной нагрузки.

Искомая матрица (для конечной точки отрезка)

$$V_i = v\tilde{D}_i \left\| \begin{matrix} I_3 & 0_3 \\ \frac{1}{2} v w_2 & I_3 \end{matrix} \right\| D_i q.$$

Значения величин v, D_i, q, w_2 приводились выше; I_3 — единичная матрица 3×3.

6. РАСЧЕТ ПРОЛЕТА

6.1. Криволинейные элементы заменяются вписанными ломаными, т. е. определяются координаты точек излома последних (см. п. 5.3 настоящего приложения). Кроме того, для криволинейных элементов должны быть вычислены значения коэффициента k_p*.

6.2. Матрицы пролета (см. черт. 7 настоящего приложения):

$$\left.\begin{aligned} a_{pj} &= \tilde{G}_{pj}; \\ \bar{b}_{pj} &= G_{jp}; \\ b_{pj} &= -\sum_{\nu=j+1}^{p} \tilde{G}_{p\nu} a_\nu G_{j\nu}; \\ \bar{c}_{pj} &= \sum_{\nu=j+1}^{p} G_{\nu p} (V_\nu + P_\nu); \\ c_{pj} &= \sum_{\nu=j+1}^{p} \tilde{G}_{p\nu} [-a_\nu (\bar{c}_{\nu j} - P_\nu) + \Delta_\nu]. \end{aligned}\right| \quad p = j+1,\ j+2,\ \ldots,\ k \qquad (9)$$

Последнюю формулу при программировании целесообразно представить в виде

$$c_{pj} = \sum_{\nu=j+1}^{p} \tilde{G}_{p\nu} \left[-a_\nu \sum_{k}^{\nu} \sum_{j+1} G_{k\nu}(V_k + P_k) + \Delta_\nu + a_\nu P_\nu \right].$$

В этих формулах

$$G_{jp} = \begin{Vmatrix} I_3 & 0_3 \\ -\bar{r}_{jp} & I_3 \end{Vmatrix}, \quad \tilde{G}_{pj} = \begin{Vmatrix} I_3 & -\bar{r}_{jp} \\ 0_3 & I_3 \end{Vmatrix},$$

где

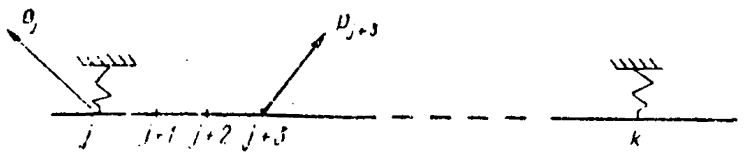
$$\bar{r}_{jp} = \begin{Vmatrix} 0 & -r_3^{jp} & r_2^{jp} \\ r_3^{jp} & 0 & -r_1^{jp} \\ -r_2^{jp} & r_1^{jp} & 0 \end{Vmatrix},$$

причем

$$r_1^{jp} = x_1^p - x_1^j;$$
$$r_2^{jp} = x_2^p - x_2^j;$$
$$r_3^{jp} = x_3^p - x_3^j$$

есть проекция радиуса-вектора $\vec{r}_{jp}$ на оси координатной системы $x_1x_2x_3$; P_ν — матрица-столбец внешней сосредоточенной нагрузки

К расчету пролета



Черт. 7

(первые три элемента задаются, а последние три равны нулю). Матрицы a_ν, V_ν, Δ_ν вычисляются по формулам, приведенным в разд. 5 настоящего приложения.

Примечания:

1. При выполнении расчета по формулам (9) с целью формирования разрешающей системы уравнений следует принимать $p=k$.

2. Если участок не имеет промежуточных опор, то нужно принимать, что участок состоит из одного пролета и $j=0$, $k=n$ (n — число отрезков в участке).

6.3. Вектор сил в начальном сечении пролета. Исходные данные: j, k — номера сечений концов пролета; λ_j, λ_k — векторы (6×1) перемещений концов пролета (см. разд. 9 настоящего приложения).

Искомый вектор

$$X_j = b_{kj}^{-1}(\lambda_k - a_{kj}\lambda_j - c_{kj}), \qquad (10)$$

где b_{kj}, a_{kj}, c_{kj} вычисляются по формулам (9) при $p=k$.

Примечание. Если в участке нет промежуточных опор, то формула (10) используется только для определения вектора сил X_0 в начальном сечении участка.

6.4. Векторы перемещений и сил в промежуточных сечениях пролета. Исходные данные: λ_i — вектор перемещений начального сечения пролета; X_j — вектор сил в начальном сечении пролета.

Искомые векторы

$$\left.\begin{aligned} \lambda_l &= \tilde{G}_{l(l-1)}\lambda_{l-1} - a_l(G_{l(l-1)}X_{l-1} + V_l) + \Delta_l; \\ X_l &= G_{l(l-1)}X_{l-1} + P_l + V_l. \end{aligned}\right\} \quad l = j+1, \ldots, k-1 \qquad (11)$$

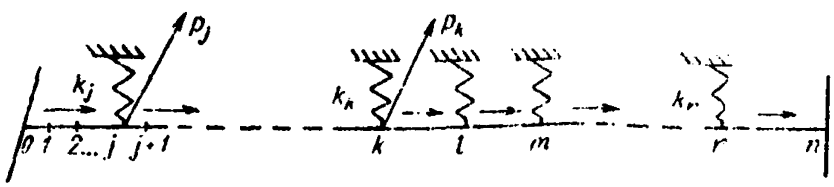
Примечание. Для последнего пролета участка (т. е. при $k=n$) по формулам (11) вычисляются, кроме того, значения матриц λ_n, X_n. Но λ_n производится контроль правильности вычислений: в случае защемленного конца перемещения λ_n должны быть равны заданным перемещениям, в противном случае — вычисленным перемещениям узла.

7. РАСЧЕТ УЧАСТКА

7.1. Последовательно вычисляются для сечений, где установлены промежуточные опоры (черт. 8 настоящего приложения), матрицы:

$$\left.\begin{aligned} L_l &= -|c_l + b_l L_k|^{-1} d_l; \\ N_l &= -|c_l + b_l L_k|^{-1} b_l N_k; \\ M_l &= |c_l + b_l L_k|^{-1}|-b_l M_k + g_l|, \end{aligned}\right\} \qquad (12)$$

К расчету участка



Черт. 8

при м

$L_0 = 0_6$ (нулевая матрица 6×6),

$N_0 = I_6$ (единичная матрица 6×6),

$M_0 = \bar{0}_6$ (нулевой вектор 6×1).

Здесь

$$\left.\begin{aligned} b_l &= \bar{b}_{lk} b_{lk}^{-1} a_{lk}; \\ c_l &= -b_{ml}^{-1} a_{ml} - \bar{b}_{lk} b_{lk}^{-1} + e_l; \\ d_l &= b_{ml}^{-1}; \\ g_l &= b_{ml}^{-1} c_{ml} - \bar{b}_{lk} b_{lk}^{-1} \bar{c}_{lk} + \bar{c}_{lk}, \end{aligned}\right\} \qquad (13)$$

где e_l — матрица 6×6, в которой ненулевым является только один элемент $e_{33}^l = k_l$ (k_l — жесткость промежуточной упругой опоры);

l — номер конца пролета;

k — номер начала пролета;

m — конец следующего пролета.

Вычисление матриц с двойной нижней индексацией производится по формулам (9).

Кроме того, вычисляются матрицы:

$$\left.\begin{aligned} N_{jn} &= N_j + \cdots + L_j \cdots L_k N_l + L_j \cdots L_k L_l N_m + \cdots + \\ &\quad + L_j \cdots L_k L_l L_m \cdots N_r; \\ M_{jn} &= M_j + \cdots + L_j \cdots L_k M_l + L_j \cdots L_k L_l M_m + \cdots + \\ &\quad + L_j \cdots L_k L_l L_m \cdots M_r; \\ L_{jn} &= L_j \cdots L_k L_l L_m \cdots L_r, \end{aligned}\right\} \qquad (14)$$

где j — конец первого пролета;

r — начало последнего пролета;

n — конец участка.

Далее вычисляются матрицы:

$$\left.\begin{aligned} A_{00} &= b_{j0}^{-1} (a_{j0} - N_{jn}); \\ B_{0n} &= b_{j0}^{-1} (c_{j0} - M_{jn}); \\ A_{0n} &= -b_{j0}^{-1} L_{jn}. \end{aligned}\right\} \qquad (15)$$

Для промежуточных участков, кроме того, вычисляются матрицы:

$$\left.\begin{aligned} A_{nn} &= \bar{b}_{nr} b_{nr}^{-1} (I_6 - a_{nr} L_r); \\ A_{n0} &= \tilde{A}_{0n}; \\ B_{n0} &= -\bar{b}_{nr} b_{nr}^{-1} (a_{nr} M_r + {}_{nr}) + \bar{c}_{nr}. \end{aligned}\right\} \qquad (16)$$

Если участок не имеет промежуточных опор, в формулах (16) следует принять

$$r = 0; \quad L_r = 0_6; \quad M_r = \bar{0}_6,$$

а в формулах (15)

$$j = n: \quad N_{jn} = 0_6; \quad M_{jn} = \bar{0}_6; \quad L_{jn} = I_6.$$

Формулы (12) и (14) в этом случае не используются.

В расчете участка принято, что в узлах промежуточные опоры отсутствуют.

8. ФОРМИРОВАНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ

8.1. Матрицы (15), (16) используются для формирования разрешающей системы уравнений

$$\left\| \begin{matrix} A^{\nu}_{\bar{1}\bar{1}} A_{\bar{1}\bar{2}} A_{\bar{1}\bar{3}} \cdots A_{\bar{1}\bar{N}} \\ \cdots\cdots\cdots \\ A_{\bar{i}\bar{1}} A_{\bar{i}\bar{2}} A_{\bar{i}\bar{3}} \cdots A_{\bar{i}\bar{N}} \\ \cdots\cdots\cdots \\ A_{\bar{N}\bar{1}} A_{\bar{N}\bar{2}} A_{\bar{N}\bar{3}} \cdots A^{\lambda}_{\bar{N}\bar{N}} \end{matrix} \right\| \times \left\| \begin{matrix} \lambda_{\bar{1}} \\ \cdots \\ \lambda_{\bar{i}} \\ \cdots \\ \lambda_{\bar{N}} \end{matrix} \right\| = \left\| \begin{matrix} B^{\nu}_{\bar{1}} \\ \cdots \\ B^{\nu}_{\bar{i}} \\ \cdots \\ B^{\nu}_{\bar{N}} \end{matrix} \right\| \qquad (17)$$

Целесообразно формирование системы (17) производить одновременно с расчетом участков, не выделяя ее в отдельный блок. Коэффициенты $A^{\nu}_{\bar{1}\bar{1}}$, $A_{\bar{1}\bar{2}}$, ... — матрицы 6×6; $\lambda_{\bar{1}}$, $\lambda_{\bar{2}}$, ..., $B^{\nu}_{\bar{1}}$, $B^{\nu}_{\bar{2}}$, ... — матрицы-столбцы 6×1.

Каждая строка системы (17) соответствует одному узлу, а именно узлу, номер которого составляет нижний индекс при λ и B^{ν} и первый нижний индекс при A (второй индекс — номер узла, с которым данный узел соединен участком).

Коэффициенты и свободные члены системы (17) вычисляются следующим образом.

Матрица $A^{\nu}_{\bar{i}\bar{i}}$ является суммой матриц A_{00}, A_{nn} участков, сходящихся в данном узле $\bar{i}$, причем для участков, нумерация точек деления которых на отрезки начинается в узле, берется A_{00}, а для участков, нумерация деления которых заканчивается в узле, берется A_{nn}. Например, для узла, показанного на черт. 9 настоящего приложения,

$$A^{\nu}_{\bar{i}\bar{i}} = A^{\bar{i}\bar{i}}_{nn} + A^{\bar{i}\bar{i}}_{nn} + A^{\bar{i}\bar{k}}_{00}.$$

Матрицы $A_{\bar{i}\bar{j}}$ $(\bar{i}\neq\bar{j})$ равны:

$$A_{\bar{i}\bar{j}} = A^{\bar{i}\bar{j}}_{0n}, \text{ если } \bar{i} < \bar{j};$$

$$A_{\bar{i}\bar{j}} = A^{\bar{j}\bar{i}}_{0n}, \text{ если } \bar{i} > \bar{j}.$$

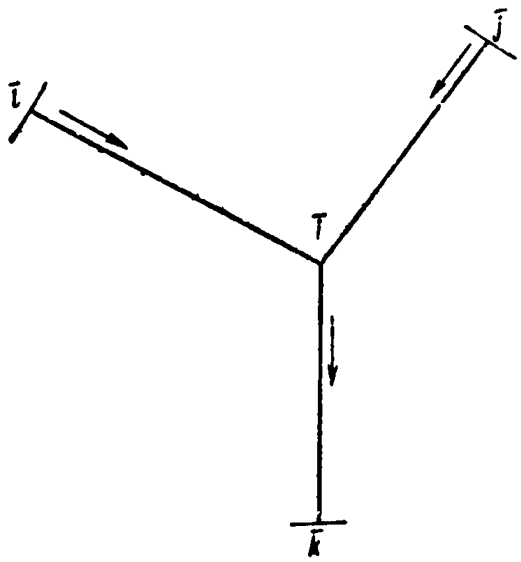
Так, для узла $\bar{i}$ (черт. 9 настоящего приложения)

$$A_{\bar{i}\bar{i}} = A^{\bar{i}\bar{i}}_{0n}; \quad A_{\bar{i}\bar{k}} = A^{\bar{i}\bar{k}}_{0n}.$$

Верхние индексы отмечают участок (второй индекс — узел, в котором заканчивается нумерация деления участка на отрезки).

Матрица $B_{\bar{i}}^{\Sigma}$ является суммой со знаком «минус» матриц B_{0n} и B_{n0} участков, сходящихся в узле $\bar{i}$, причем для участков, нумерация точек деления которых на отрезки начинается в узле, берется матрица B_{0n}, а для таких участков, нумерация точек деления которых заканчивается в узле, берется B_{n0}. В случае, когда к узлу под-

К формированию системы матричных уравнений



Черт. 9

ходит концевой участок, в сумму $B_{\bar{i}}^{\Sigma}$ включается также матрица $A_{0n}\lambda_n$ этого участка. Например, для узла, показанного на черт. 9 настоящего приложения, если участок $\bar{i}\bar{k}$ концевой,

$$B_{\bar{i}}^{\Sigma} = -(B_{0n}^{\bar{i}\bar{k}} + B_{n0}^{\bar{j}\bar{i}} + B_{n0}^{\bar{l}\bar{i}} + A_{0n}^{\bar{i}\bar{k}}\lambda_n^{\bar{i}\bar{k}}).$$

Вместе с тем эта матрица A_{0n} исключается из матрицы коэффициентов системы (17).

В случае когда трубопроводная система имеет один узел, матрица перемещений его определяется по формуле

$$\lambda_{\bar{I}} = (A_{\bar{I}\bar{I}}^{\Sigma})^{-1} B_{\bar{I}}^{\Sigma}.$$

При выборе метода для решения системы уравнений следует учитывать, что матрица коэффициентов получается симметричной, положительно определенной и может иметь большое количество нулевых элементов.

9. РАСЧЕТ УСИЛИЙ, ПЕРЕМЕЩЕНИЙ, НАПРЯЖЕНИЙ

9.1. Перемещения сечений, где устанавливаются промежуточные упругие опоры, т. е. перемещения концевых сечений пролета, вычисляются по формуле обратного хода (см. черт. 8 настоящего приложения)

$$\lambda_i = L_i\lambda_m + N_i\lambda_0 + M_i.$$

Усилия в начальных сечениях пролетов вычисляются по формуле (10). Для участков без промежуточных опор усилия X_0 вычисляются по той же формуле при $j=0$, $k=n$.

Усилия и перемещения в промежуточных сечениях пролета вычисляются по формуле (11).

В вычисляемых матрицах сил первые три элемента являются проекциями вектора силы на оси x_1, x_2, x_3, а остальные три — проекциями вектора момента на те же оси. Первые три элемента матриц перемещений — проекции вектора поступательного перемещения на оси x_1, x_2, x_3, а остальные три — проекции вектора углового перемещения на эти оси.

Для сечений $0, 1, 2, \ldots, n$ участков, а также для сечений, расположенных посередине криволинейных отрезков, вычисляются напряжения. Предварительно матрица сил X_i, действующих в этих сечениях, должна быть преобразована к осям подвижной координатной системы по следующим формулам:

$$X_i'' = D_i X_i;$$
$$X_i'' = D_i^0 D_i X_i.$$

Первая формула справедлива для сечения, расположенного в конце прямолинейного отрезка и на середине криволинейного отрезка, а вторая — для сечения, расположенного в конце криволинейного отрезка.

Матрица D_i вычисляется в соответствии с указаниями разд. 5 настоящего приложения. Для сечений, расположенных в середине и в конце криволинейного отрезка, матрица D_i вычисляется для отрезка в целом (α_i вычисляется по формуле (5)).

Матрица D_i^0 равна

$$D_i^0 = \left\| \begin{matrix} \alpha_i^0 & 0_3 \\ 0_3 & \alpha_i^0 \end{matrix} \right\|$$

где

$$\alpha_i^0 = \left\| \begin{matrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\frac{\theta_i^*}{2} & \sin\frac{\theta_i^*}{2} \\ 0 & -\sin\frac{\theta_i^*}{2} & \cos\frac{\theta_i^*}{2} \end{matrix} \right\|.$$

При определении напряжений в поперечных сечениях трубопровода следует учитывать равенства (см. разд. 5 РТМ):

$$N_z = -X_3'';$$
$$M_x = -X_4'';$$
$$M_y = X_5'';$$
$$|M_z| = |X_6''|,$$

где X_3'', X_4'', X_5'', X_6'' — элементы вектора внутренних сил, отнесенного к текущей системе координат.

Угол Ф, характеризующий положение бокового отверстия в трубе (случай тройникового узла, см. черт. 12 РТМ), должен отсчитываться от положительной оси x_1'' в сторону положительной оси x_2''. Напряжение σ^0_{zMN} определяется при этом по формуле:

$$\sigma^0_{zMN} = \frac{-X_4'' \sin\Phi + X_5'' \cos\Phi}{W} - \frac{X_3''}{F}.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 2 К РТМ 24.038.08—72

Справочное

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

1. Криволинейный отрезок трубопровода — штампо-сварное колено сечением 720×14 *мм* из стали марки 20; радиус оси его $R=1000$ *мм*. Рабочие параметры транспортируемой среды $p=44$ *кгс/см*^{2}, $t_р=320°$ С. Внутренние моменты, возникающие в сечении криволинейного отрезка, даны в табл. 1 настоящего приложения. Произведем расчет прочности этого отрезка трубопровода.

Таблица 1

Этап расчета	M_x, *кгс·см*	M_y, *кгс·см*	M_z, *кгс·см*	N_z
I	400 000	500 000	1 000 000	0
III	—1 000 000	1 500 000	1 000 000	0

Определяем (см. п. 4.3 РТМ):

$$r=\frac{D_н-s}{2}=\frac{72-1,4}{2}=35,3\ см;$$

$$\lambda=\frac{Rs}{r^2}=\frac{100\cdot 1,4}{35,3^2}=0,11;$$

$$\omega=1,82\frac{p}{E}\cdot\frac{R^2}{sr}=1,82\frac{44\cdot 100^2}{1,87\cdot 10^6\cdot 1,4\cdot 35,3}=0,0087$$

(модуль упругости $E=1,87\cdot 10^6$ *кгс/см*^{2} определен по черт. 3 РТМ).

Подсчитываем момент сопротивления (см. п. 5.2.2. РТМ):

$$W=0,0982D_н^3\left[1-\left(\frac{D_н-2s}{D_н}\right)^4\right]=$$

$$=0,0982\cdot 72^3\left[1-\left(\frac{72-2\cdot 1,4}{72}\right)^4\right]=5535\ см^3,$$

Коэффициент прочности, продольного сварного стыка $\varphi=1$ (см. п. 5.2.2. РТМ). Пусть допуск на утонение стенки трубы $c_1=0,05$ *см*. При этих условиях приведенное напряжение от давления (см. п. 5.2.2. РТМ).

$$\sigma_{пр}=\frac{p[D_н-(s-c_1)]}{2\varphi(s-c_1)}=\frac{44[72-(1,4-0,05)]}{2\cdot 1(1,4-0,05)}=1146\ кгс/см^2.$$

Вначале выполняем расчет прочности по этапу I полного расчета. Принимаем коэффициент перегрузки $k_п = 1{,}4$.

Определяем продольное и касательное напряжения (см. п. 5.2.2. РТМ):

$$\sigma_{zMN} = k_п \left(\frac{0{,}8 \sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{\varphi_п W} + \frac{|N_z|}{F} \right) =$$

$$= 1{,}4 \left(\frac{0{,}8 \sqrt{(4 \cdot 10^5)^2 + (5 \cdot 10^5)^2}}{1 \cdot 5535} + 0 \right) = 129{,}5 \ кгс/см^2;$$

$$\tau = \frac{k_п M_z}{2W} = \frac{1{,}4 \cdot 1 \cdot 10^6}{2 \cdot 5535} = 126{,}5 \ кгс/см^2.$$

Теперь определяем эффективное напряжение, применяя формулу п. 5.2.2. РТМ:

$$\sigma_{эф} = \sqrt{0{,}75 \sigma_{пр}^2 + \sigma_{zMN}^2 + 3\tau^2} =$$

$$= \sqrt{0{,}75 \cdot 1146^2 + 129{,}5^2 + 3 \cdot 126{,}5^2} = 1024 \ кгс/см^2.$$

Учитывая, что в данном случае $\lambda < 1{,}4$, определяем эффективное напряжение также по формуле п. 5.2.3. По черт. 9 РТМ определяем $\Omega = 5{,}8$. Учитывая значение $\sigma_{пр}/\sigma_{доп} \approx 1$ ($\sigma_{доп} = 1140 \ кгс/см^2$ (см. табл. 5 РТМ)), находим $\Psi = 0{,}68$ (см. черт. 10 РТМ). Теперь определяем эффективное напряжение

$$\sigma_{эф} = \frac{k_п \Omega}{W \Psi} \sqrt{M_x^2 + M_z^2} = \frac{1{,}4 \cdot 5{,}8}{5535 \cdot 0{,}68} \sqrt{(4 \cdot 10)^2 + (5 \cdot 10^5)^2} = 1380 \ кгс/см^2.$$

Поскольку $1{,}5\sigma_{доп} = 1710 \ кгс/см^2$, заключаем, что условие прочности $\sigma_{эф} \leqslant 1{,}5\sigma_{доп}$ (см. п. 6.1 РТМ) для этапа I полного расчета удовлетворяется.

Далее выполняем расчет прочности по этапу III полного расчета (трубопровод относится к классу низкотемпературных трубопроводов).

По черт. 17 и 18 РТМ определяем $\gamma_m = 5{,}0$; $\beta_m = 3{,}7$. Применяя формулы п. 5.4.3 РТМ, вычисляем напряжение $\sigma^э_{y\,max}$ для двух случаев: $a = 0$ и $a = 5\%$. Поскольку $M_x < 0$, следует принять $k_п^* = k_п = 1{,}4$. Приводим подсчет только по формулам, которые дают наибольшее значение напряжения:

при $\tau = 0$

$$\sigma^э_{y\,max} = \frac{1}{W} \sqrt{\left[(k_п^* M_x + 2M_э) \gamma_m + |k_п M_y| \beta_m + W \sigma_{пр} \right]^2 + (2k_п M_z)^2} =$$

$$= \frac{1}{5535} \sqrt{[(1{,}4 \cdot 1 \cdot 10^6 + 2 \cdot 0) 5{,}0 + 1{,}4 \cdot 1{,}5 \cdot 10^6 \cdot 3{,}7 + \cdots}$$

$$\cdots + 5535 \cdot 1146]^2 + (2 \cdot 1{,}4 \cdot 1 \cdot 10^6)^2} = 3850 \ кгс/см^2;$$

при $a=5\%$ (см. п. 5.3.3)

$$M_n = -pW\frac{R}{r}\cdot\frac{D_н}{s}\cdot\frac{a}{100} = 44\cdot 5535\,\frac{100}{35,3}\cdot\frac{72}{1,4}\cdot\frac{5}{100} =$$

$$= -1\,770\,000\ кгс\cdot см;$$

$$\sigma^э_{y\,max} = \frac{1}{W}\sqrt{[|(k_н{}^*M_x + 2M_э)|\,\gamma_m + |k_н M_y|\,\vartheta_n + W\tau_{пр}|^2 + (2k_н M_z)^2} =$$

$$= \frac{1}{5535}\sqrt{[(1,4\cdot 1\cdot 10^6 + 2\cdot 1,773\cdot 10^6)5,0 + 1,4\cdot 1,5\cdot 10^6\cdot 3,7 + \cdots \rightarrow}$$

$$\leftarrow \cdots + 5535\cdot 1146]^2 + (2\cdot 1,4\cdot 1\cdot 10^6)^2} = 7000\ кгс/см^2.$$

Видим, что наличие начальной эллиптичности сечения заметно влияет на напряжение $\sigma^э_{y\,max}$. Допустимое расчетное количество циклов нагружения при отсутствии эллиптичности составляет 40 000, а при эллиптичности $a=5\%$ — только 5500 (см. черт. 19 РТМ).

2. Криволинейная труба, изогнутая по радиусу $R=1750$ *мм*, имеет сечение 426×17 *мм*. Материал трубы — сталь марки 12Х1МФ. Рабочие параметры транспортируемой среды: $p=40$ *кгс/см*^{2}, $t_р=570°$ С. Произведем расчет прочности этой трубы по этапам II и IV полного расчета с учетом значений силовых факторов, указанных ниже.

Определяем безразмерные параметры (см. п. 4.3 РТМ):

$$r = \frac{D_н - s}{2} = \frac{42.6 - 1,7}{2} = 20,45\ см;$$

$$\lambda = \frac{Rs}{r^2} = \frac{175\cdot 1,7}{20,45^2} = 0,71;$$

$$\omega = 1,82\frac{p}{E}\cdot\frac{R^2}{sr} = 1,82\,\frac{40}{1,74\cdot 10^6}\cdot\frac{175^2}{1,7\cdot 20,45} = 0,0368 \text{ (для этапа II)};$$

$$\omega = 0 \text{ (для этапа IV)}.$$

Модуль упругости $E=1,74\cdot 10^6$ *кгс/см*^{2} определен по черт. 3 ТМ.

Далее приводится подсчет коэффициента податливости и коэффициентов интенсификации напряжений для расчета по этапу II (см. пп 4.3 и 5.6 РТМ):

$$= 1,010 + 1633\lambda^2 + 99\omega = 1,010 + 1633\cdot 0,71^2 + 99\cdot 0,0368 = 828;$$

$$a_2 = 1,016 + 661\lambda^2 + 63\omega - \frac{0,2316}{a_1} =$$

$$= 1,016 + 661\cdot 0,71^2 + 63\cdot 0,0368 - \frac{0,2316}{828} = 336;$$

$$a_3 = 1,028 + 204\lambda^2 + 35\omega - \frac{0,2197}{a_2} =$$

$$= 1,028 + 204\cdot 0,71^2 + 35\cdot 0,0368 - \frac{0,2197}{336} = 105,0;$$

$$a_3 = 1{,}062 + 37{,}5\lambda^2 + 15\omega - \frac{0{,}1914}{105{,}0} =$$

$$= 1{,}062 + 37{,}5 \cdot 0{,}71^2 + 15 \cdot 0{,}0368 - \frac{0{,}1914}{105{,}0} = 20{,}5;$$

$$b = 0{,}125 + 1{,}5\lambda^2 + 3\omega - \frac{0{,}0977}{a_3} =$$

$$= 0{,}125 + 1{,}5 \cdot 0{,}71^2 + 3 \cdot 0{,}0368 - \frac{0{,}0977}{20{,}5} = 0{,}986;$$

$$k_p = 1 + \frac{1{,}125}{b} = 1 + \frac{1{,}125}{0{,}986} = 1 + 1{,}14 = 2{,}14;$$

$$A_{22} = -\frac{1}{b} = -\frac{1}{0{,}986} = -1{,}015;$$

$$A_{42} = \frac{0{,}3125}{a_4} A_{22} = \frac{0{,}3125}{20{,}5}(-1{,}015) = -0{,}0155;$$

$$A_{62} = \frac{0{,}4375}{a_3} A_{42} = \frac{0{,}4375}{105{,}0}(-0{,}0155) = -6{,}45 \cdot 10^{-5};$$

$$A_{82} = \frac{0{,}4687}{a_2} A_{62} = \frac{0{,}4687}{336}(-6{,}45 \cdot 10^{-5}) = -9{,}0 \cdot 10^{-8};$$

$$A_{10.2} = \frac{0{,}4812}{a_1} A_{82} = \frac{0{,}4812}{828}(-9{,}0 \cdot 10^{-8}) = -52{,}3 \cdot 10^{-12};$$

$$\gamma_m = 0{,}75\lambda \sum_{l=2,4,\ldots}^{10} A_{l2}(1 - l^2) = 0{,}75 \cdot 0{,}71 \left[(-1{,}015)(1 - 2^2) + \right.$$

$$+ (-0{,}0155)(1 - 4^2) + (-6{,}45 \cdot 10^{-5})(1 - 6^2) + (-9{,}0 \cdot 10^{-8})(1 - 8^2) +$$

$$\left. + (-52{,}3 \cdot 10^{-12}) \cdot (1 - 10^2)\right] = 1{,}745;$$

$$\beta_m = k_p + 1{,}5 \sum_{l=2,4,\ldots}^{10} \frac{A_{l2}}{l} = 2{,}14 + 1{,}5\left[\left(-\frac{1{,}015}{2}\right) + \left(-\frac{0{,}0155}{4}\right) + \right.$$

$$\left. + \left(-\frac{6{,}45 \cdot 10^{-5}}{6}\right) + \left(-\frac{9{,}0 \cdot 10^{-8}}{8}\right) + \left(-\frac{52{,}3 \cdot 10^{-12}}{10}\right)\right] =$$

$$= 2{,}14 - 1{,}5 \cdot 0{,}512 = 1{,}354.$$

Значения γ_m и β_m для расчета по этапу IV определяем по черт. 17 и 18 РТМ: $\gamma_m = 1{,}9$, $\beta_m = 1{,}4$.

Определяем коэффициенты:

$\chi_c = 1{,}2\chi = 1{,}2 \cdot 0{,}4 = 0{,}48$ (см. п. 5.3.3 и черт. 1 РТМ);

$\chi_{э1} = -0{,}7\delta = -0{,}7 \cdot 1{,}0 = -0{,}7$ (см. п. 5.5.3 и черт. 2 РТМ).

Вычисляем приведенное напряжение от давления, полагая $\varphi = 1$, $c_1 = 0{,}085$ *см* (п. 5.2.2 РТМ):

$$\sigma_{пр} = \frac{p\,|D_н - (s - c_1)|}{2\,(s - c_1)} = \frac{40\,|42{,}6 - (1{,}7 - 0{,}085)|}{2\,(1{,}7 - 0{,}085)} = 506 \text{ кгс/см}^2.$$

Момент сопротивления подсчитываем по формуле п. 5.2.2 РТМ:

$$W = 0{,}0982 D_н^3 \left[1 - \left(\frac{D_н - 2s}{D_н}\right)^4\right] = 0{,}0982 \cdot 42{,}6^3 \left[1 - \left(\frac{42{,}6 - 2 \cdot 1{,}7}{42{,}6}\right)^4\right] =$$
$$= 2160 \text{ см}^3.$$

При выполнении расчетов с учетом начальной эллиптичности сечения (принимаем $a = 4\%$) учитывается значение

$$M_э = -pW \frac{R}{r} \cdot \frac{D_н}{s} \cdot \frac{a}{100} = -40 \cdot 2160 \frac{175}{20{,}45} \cdot \frac{42{,}6}{1{,}7} \cdot \frac{4}{100} =$$
$$= -737\,000 \text{ кгс} \cdot \text{см}.$$

Результаты расчетов для различных условий нагружения трубы приведены в табл. 2 настоящего приложения. Принималось значение коэффициента перегрузки $k_п = 1{,}4$. Во всех случаях получалось значение $k_п^* = k_п = 1{,}4$. Максимальные значения $\sigma_{экв}$ давались третьей из четырех формул пп. 5.3.3 и 5.5.3. Допускаемое напряжение $\sigma_{доп}$ принято по табл. 6 РТМ.

Таблица 2

Этап расчета	M_x, кгс·см	M_y, кгс·см	M_z, кгс·см	a %	$\sigma_{экв}$, кгс/см²	$2{,}5\sigma_{доп}$, кгс/см²
II	210 000	0	400 000	0	787	1324
	210 000	0	400 000	4	610	1324
	−210 000	0	400 000	4	1060	1324
IV	1 000 000	0	1 000 000	0	1450	4320
	1 000 000	0	1 000 000	4	1890	4320
	−1 000 000	0	1 000 000	4	964	4320

Приводим в качестве примера подсчет $\sigma_{экв}$ для одного случая условий нагружения (этап II):

$$\sigma_{экв} = \frac{1}{W} \sqrt{\left[(k_п^* M_x + \chi_э M_э)\left|\gamma_m + W\sigma_{пр}\right|^2 + (k_п M_z)^2\right]} =$$
$$= \frac{1}{2160} \sqrt{\left[(1{,}4 \cdot 0{,}21 \cdot 10^6 - 0{,}48 \cdot 0{,}737 \cdot 10^6)\, 1{,}745 + \right.} \cdots \rightarrow$$
$$\leftarrow \cdots \left. + 2160 \cdot 506\right]^2 + (1{,}4 \cdot 0{,}4 \cdot 10^6)^2} = 610 \text{ кгс/см}^2.$$

3. Тройниковый узел состоит из трубы 245×45 *мм* из стали марки 15Х1М1Ф и вваренного в нее штуцера. Рабочие параметры транспортируемой среды: $p = 254$ кгс/см², $t_р = 565°$ С. Произведем расчет прочности для сечения трубы 245×45 *мм*, проходящего около кромки отверстия под штуцер, при условии, что силовые факторы в этом сечении имеют значения, указанные в табл. 3 настоящего приложения.

Допустим, что угол, определяющий положение отверстия, равен $\Phi = 40°$ (см. черт. 12 РТМ).

Таблица 3

Этап расчета	M_x, кгс·см	M_y, кгс·см	M_z, кгс·см	N_z, кгс
II	550 000	−205 000	70 000	−2000
IV	−1 650 000	613 000	210 000	6000

Определяем приведенное напряжение в стенке трубы от давления (см. п. 5.2.2 РТМ), полагая, что допуск на утонение стенки $c_1 = 0{,}22$ *см*:

$$\sigma_{пр} = \frac{p\,|D_н - (s - c_1)|}{2\,(s - c_1)} = \frac{254\,|24{,}5 - (4{,}5 - 0{,}22)|}{2\,(4{,}5 - 0{,}22)} = 598 \text{ кгс/см}^2.$$

Определяем далее характеристики поперечного сечения (см. п. 5.2.2 РТМ):

$$W = 0{,}0982 D_н^3 \left[1 - \left(\frac{D_н - 2s}{D_н}\right)^4\right] =$$

$$= 0{,}0982 \cdot 24{,}5^3 \left[1 - \left(\frac{24{,}5 - 2 \cdot 4{,}5}{24{,}5}\right)^4\right] = 1210 \text{ см}^3;$$

$$F = \pi s (D_н - s) = \pi \cdot 4{,}5\,(24{,}5 - 4{,}5) = 283 \text{ см}^3.$$

Коэффициент концентрации упругих напряжений определяем по черт. 16 РТМ в зависимости от отношения $D_н/D_в = 245/(245 - 90) = 1{,}58$: $K_0 = 3{,}19$.

Коэффициент концентрации напряжений при установившейся ползучести определяем по п. 5.3.4 РТМ. Учитывая, что показатель ползучести $m = 3{,}0$ (см. черт. 14 РТМ), находим

$$K_{01} = 1 + \frac{1{,}5}{m} = 1 + \frac{1{,}6}{3{,}0} = 1{,}5.$$

Далее расчет выполняется раздельно по этапу II полного расчета и по этапу IV (данный трубопровод — высокотемпературный).

Определяем продольное и касательное напряжения на этапе II (см. п. 5.3.4 РТМ):

$$\sigma^0_{zMN} = \frac{M_x \sin\Phi - M_y \cos\Phi}{W} + \frac{N_z}{F} = \frac{550\,000 \sin 40° - (-205\,000)\cos 40°}{1210} +$$

$$+ \frac{-2000}{283} = 415 \text{ кгс/см}^2;$$

$$\tau = \frac{k_п M_z}{2W} = \frac{1{,}4 \cdot 70\,000}{2 \cdot 1210} = 40{,}4 \text{ кгс/см}^2$$

(принимаем коэффициент перегрузки $k_п = 1{,}4$).

Поскольку $\sigma^0_{zMN} > 0$, определяем (см. п. 5.3.4 РТМ):

$$(K_{01} - 1)\frac{k_п}{k_п^2 + 1} = (1{,}5 - 1)\frac{1{,}4}{1{,}4^2 + 1} = 0{,}230.$$

Замечаем, что неравенство

$$\frac{\sigma^0_{zMN}}{\psi_{пр}} < (K_{01} - 1)\frac{k_п}{k_п^2 + 1}$$

в данном случае не выполняется. Поэтому следует принять $k_п^* = k_п = 1{,}4$.

Определяем эквивалентное напряжение по формуле (9) РТМ:

$$\sigma_{экв} = \sqrt{(\sigma_{пр}K_{01})^2 + (k_п^*\sigma^0_{zMN} + 0{,}5\sigma_{пр})^2} - \sigma_{пр}K_{01}(k_п^*\sigma^0_{zMN} + 0{,}5\sigma_{пр}) + 3\tau^2 =$$

$$= \sqrt{(598 \cdot 1{,}5)^2 + (1{,}4 \cdot 415 + 0{,}5 \cdot 598)^2} - 598 \cdot 1{,}5\,(1{,}4 \cdot 415 + 0{,}5 \cdot 598) + 3 \cdot 40{,}4^2 = 892\ кгс/см^2.$$

Условие прочности $\sigma_{экв} \leqslant 1{,}8\,\sigma_{доп}$ (см. п. 6.2 РТМ) обеспечивается, так как $1{,}8\,\sigma_{доп} = 1{,}8 \cdot 600 = 1080\ кгс/см^2$ (значение $\sigma_{доп}$ принято по черт. 21 РТМ).

Аналогичным образом выполняем расчет по этапу IV. Определяем:

$$\sigma^0_{zMN} = \frac{-1\,650\,000 \sin 40^\circ - 613\,000 \cos 40^\circ}{1210} + \frac{6000}{283} = -1242\ кгс/см^2;$$

$$\tau = \frac{1{,}4 \cdot 210\,000}{2 \cdot 1210} = 121{,}5\ кгс/см^2;$$

Устанавливаем, что для данного случая справедливо неравенство (см. п. 5.5.4 РТМ)

$$\left|\frac{\sigma^0_{zMN}}{\sigma_{пр}}\right| > (K_0 - K_{01})\frac{k_п}{k_п^2 + 1}.$$

Следовательно, $k_п^* = k_п = 1{,}4$. Эквивалентное напряжение подсчитываем по формуле п. 5.5.4 РТМ:

$$\sigma_{экв} = \sqrt{\sigma_{пр}^2(K_{01} - K_0)^2 + (k_п^*\sigma^0_{zMN})^2} - k_п^*\sigma_{zMN}\sigma_{пр}(K_{01} - K_0) + 3\tau^2 =$$

$$= \sqrt{598^2(1{,}5 - 3{,}19)^2 + (1{,}4 \cdot 1242)^2} - 1{,}4(-1242) \cdot 598\,(1{,}5 - 3{,}19) + 3 \cdot 121{,}5^2 = 1520\ кгс/см^2.$$

Определяя по табл. 6 РТМ $\sigma_{доп} = 1920\ кгс/см^2$ (для 20° С), замечаем, что условие прочности $\sigma_{экв} \leqslant 1{,}8\sigma_{доп}$ удовлетворяется.

4. Равнопроходный тройниковый узел образован вваркой трубы 720×14 *мм* в трубу 720×14 *мм*. Рабочие параметры среды: $p = 44\ кгс/см^2$, $t = 320^\circ$ С. Материал труб — сталь марки 20.

Расчет прочности выполним только для одного сечения, проходящего около кромки бокового отверстия. Учитывая, что трубопро-

вод низкотемпературный, оценку прочности произведем по внутренним силовым факторам, которые определяются на этапе III полного расчета. Пусть эти силовые факторы имеют следующие значения:

$$M_x = 6{,}3 \cdot 10^6 \text{ кгс см}; \quad M_y = -2{,}0 \cdot 10^6 \text{ кгс} \cdot \text{см};$$

$$M_z = 0{,}6 \cdot 10^6 \text{ кгс} \cdot \text{см}; \quad N_z = 10\,000 \text{ кгс}.$$

Допустим, что угол, определяющий положение бокового отверстия, равен $\Phi = 40^\circ$ (см. черт. 12 РТМ).

Определяем продольное и касательное напряжения (см. п. 5.4.4 РТМ):

$$\sigma^0_{zMN} = \frac{M_x \sin\Phi - M_y \cos\Phi}{W} + \frac{N_z}{F} =$$

$$= \frac{6{,}3 \cdot 10^6 \sin 40^\circ - (-2{,}0 \cdot 10^6) \cos 40^\circ}{5536} + \frac{10\,000}{310} = 1042 \text{ кгс/см}^2;$$

$$\tau = \frac{1{,}4 \cdot 0{,}6 \cdot 10^6}{2 \cdot 5536} = 75{,}5 \text{ кгс/см}^2.$$

Значение W определено в п. 1 настоящего приложения. $F = \pi s \times (D_н - s) = 3{,}14 \cdot 1{,}4\,(72 - 1{,}4) = 310$ см^2. Принято $k_п = 1{,}4$.

Коэффициент концентрации напряжений K_0 определяем по черт. 16 РТМ в зависимости от отношения $D_н/D_в = 72{,}0/69{,}2 = 1{,}04$: $K_0 = 3{,}58$.

Приведенное напряжение от давления $\sigma_{пр} = 1146$ кгс/см^2 (см. п. 1 настоящего приложения).

Учитывая, что $\sigma^0_{zMN} > 0$, определяем (см. п. 5.4.4 РТМ):

$$\frac{\sigma^0_{zMN}}{\sigma_{пр}} = \frac{1042}{1146} = 0{,}91; \quad (0{,}6K_0 - 1)\frac{k_п}{k_п^2 + 1} = (0{,}6 \cdot 3{,}58 - 1)\frac{1{,}4}{1{,}4^2 + 1} =$$

$$= 0{,}406.$$

Поскольку не соблюдается условие

$$\frac{\sigma^0_{zMN}}{\sigma_{пр}} < (0{,}6K_0 - 1)\frac{k_п}{k_п^2 + 1},$$

следует принять $k_п^* = k_п = 1{,}4$.

Далее по формуле (11) РТМ вычисляем:

$$\sigma^э_{y\,max} = \sqrt{\sigma^2_{пр}(0{,}4K_0^2 - 0{,}3K_0 + 0{,}25) + (k_т^* \sigma^0_{zMN})^2 - \cdots}$$

$$\cdots - k_п^* \sigma_{пр} \sigma^0_{zMN}(0{,}6K_0 - 1) + 3\tau^2} =$$

$$= \sqrt{1146^2(0{,}4 \cdot 3{,}58^2 - 0{,}3 \cdot 3{,}58 + 0{,}25) + (1{,}4 \cdot 1042)^2 - \cdots}$$

$$\cdots - 1{,}4 \cdot 1146 \cdot 1042(0{,}6 \cdot 3{,}58 - 1) + 3 \cdot 75{,}5^2} = 2350 \text{ кгс/см}^2.$$

Если расчетное число циклов нагружения 10^4, то допустимая амплитуда напряжений $[\sigma_a] = 1800$ кгс/см^2 (см. черт. 19 РТМ); следовательно, условие прочности $\sigma_{y\,max} \leqslant 2[\sigma_a]$ удовлетворяется.

Произведем теперь оценку прочности, выполняя расчет по формуле (12) РТМ. Предварительно подсчитываем:

$$r = \frac{D_н - s}{2} = \frac{72 - 1{,}4}{2} = 35{,}2 \text{ см};$$

$$\lambda = \frac{s}{r} = \frac{1{,}4}{35{,}3} = 0{,}0393;$$

$$\omega = 1{,}82 \frac{p}{E} \cdot \frac{r}{s} = 1{,}82 \frac{44 \cdot 35{,}3}{1{,}88 \cdot 10^6 \cdot 1{,}4} = 0{,}00107$$

(модуль упругости E определен по черт. 3 РТМ). По черт. 17 РТМ определяем $\gamma_m = 13{,}0$. Теперь вычисляем по формуле (12) РТМ:

$$\sigma^э_{\text{у max}} = \frac{1}{W} \sqrt{(k_п \gamma_m \sqrt{M_r^2 + M_y^2} + 2 W \sigma_{пр})^2 + (2 k_п M_z)^2} =$$

$$= \frac{1}{5535} \sqrt{(1{,}4 \cdot 13{,}0 \sqrt{(6{,}3 \cdot 10^6)^2 + (2 \cdot 10^6)^2} + \cdots \rightarrow$$

$$\cdots \rightarrow + 2 \cdot 5535 \cdot 1146)^2 + (2 \cdot 1{,}4 \cdot 0{,}6 \cdot 10^6)^2} = 11\,800 \text{ кгс/см}^2.$$

Это значение больше допустимого значения даже при числе циклов 3000 (для этого числа циклов допустимое значение, как следует из черт. 19 РТМ, равно $2[\sigma_a] = 8400$ кгс/см^2).

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды. М., «Недра», 1970.

2. Нормы расчета элементов паровых котлов на прочность. М., «Недра», 1966.

3. Расчеты трубопроводных систем на электронных вычислительных машинах. «Руководящие указания», вып. 26. Л., 1969 (ЦКТИ).

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
1. Обозначения и единицы измерений основных величин	3
2. Этапы полного расчета трубопровода	4
3. Определение усилий воздействия трубопровода на оборудование	10
4. Определение коэффициента податливости криволинейных труб и секторных колен	11
5. Определение напряжений	17
6. Критерии прочности	32
7. Применение и учет монтажной растяжки	36
Приложение 1. Алгоритм расчета трубопроводных систем	40
Приложение 2. Примеры расчета	58
Литература	66

Ответственный за выпуск *В. С. Рязанова.*

Редактор *З. Т. Потапова.*

Техн. ред. *Н. П. Белянина.* Корректор *Г. Х. Макарова.*

Сдано в набор 7/11 1973 г. Подп. к печ. 22/VI 1973 г. Форм. бум. 60×90¹/₁₆.

Объем 4¼ печ. л. Тираж 1000. Зак. 140. Цена 65 коп.

gost.e-ecolog.ru

Группа полиграфических работ ОНТИ ЦКТИ им. И. И. Ползунова.

194021, Ленинград, Политехническая ул., д. 24.

Допечатка Объем 4¼ печ. л. Тираж 300 Заказ 72 Цена 65 коп.

РИО НПО ЦКТИ 1980