РУКОВОДЯЩИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА ПРОЧНОСТЬ

РТМ 108.020.01—75

Издание официальное

gost.e-ecolog.ru

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

Директор	Н. М. МАРКОВ
Заведующий базовым отраслевым отделом стандартизации	К. А. СУПРЯДКИН
Заведующий отделом прочности	В. С. ПОСТОЕВ
Руководитель темы	Д. Л. КОСТОВЕЦКИЙ
Исполнители:	Б. Н. ТОКАРСКИЙ, Е. А. ДРАЧ

ПОДГОТОВЛЕН К УТВЕРЖДЕНИЮ Техническим управлением Министерства энергетического машиностроения

Начальник Технического управления	В. П. ПЛАСТОВ

СОГЛАСОВАН с Научно-исследовательским и конструкторским институтом энергетической техники

Заместитель директора	Б. Б. БАТУРОВ

с Всесоюзным теплотехническим институтом им. Ф. Э. Дзержинского

Заместитель директора	В. Б. РУБИН

с Всесоюзным государственным проектным институтом «Теплоэлектропроект»

Заместитель главного инженера	А. Б. СУХОВ

УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ указанием Министерства энергетического машиностроения от 16 июля 1975 г. № ПС-002/603

Заместитель министр	П. О. СИРЫЙ

УДК [621.311.25 : 621.039] : 621.643.539.4

Группа Ф02

РУКОВОДЯЩИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

РАСЧЕТ ТРУБОПРОВОДОВ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА ПРОЧНОСТЬ

РТМ 108.020.01—75

Введен впервые

Указанием Министерства энергетического машиностроения от 16 июля 1975 г. № ПС-002/603 срок действия установлен

с 1 мая 1976 г.

до 1 мая 1981 г.

Настоящий руководящий технический материал (РТМ) определяет основные требования к расчету прочности трубопроводов первого и второго контуров атомных электростанций (АЭС) с водоводяными и графито-водяными (уран-графитовыми) реакторами на совместное действие внутреннего давления, весовой нагрузки и самокомпенсации температурных расширений.

В РТМ даны также указания по расчету трубопроводов с учетом температурных напряжений, возникающих на нестационарных режимах работы, а также с учетом сейсмического воздействия и других нагрузок.

Требования РТМ могут быть распространены и на другие трубопроводы указанных АЭС, а именно на трубопроводы, к которым предъявляется требование повышенной надежности.

РТМ распространяется на расчет только низкотемпературных трубопроводов. К таким трубопроводам относятся трубопроводы из углеродистых и низколегированных сталей, эксплуатирующиеся при рабочей температуре не более 360°С, и трубопроводы из хромоникелевых аустенитных сталей с рабочей температурой не выше 450°С.

Трубопроводы, на которые распространяется настоящий РТМ, должны удовлетворять соответствующим требованиям, содержа-

Издание официальное Перепечатка воспрещена

щимся в Правилах по устройству и безопасной эксплуатации оборудования атомных электростанций [3].

РТМ составлен в соответствии с требованиями норм расчета на прочность оборудования АЭС [2]. При его подготовке использованы также материалы РТМ по расчету трубопроводов тепловых электрических станций [4], [5].

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Толщина стенки труб и штуцеров, а также размеры заглушек и приварных накладок для укрепления отверстий должны определяться расчетом прочности на действие давления по нормам расчета на прочность оборудования АЭС [2].

Для выполнения расчета прочности трубопроводов по настоящему РТМ необходимо предварительное определение возникающих в них внутренних сил и моментов. 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.

Предусматривается выполнение расчета прочности трубопровода как на статическое, так и на циклическое нагружение. Расчет на статическое нагружение производится по формулам, полученным по методу предельных нагрузок. Расчет же на циклическое нагружение выполняется в двух вариантах: на приспособляемость и на малоцикловую усталость. Содержащиеся в РТМ указания по расчету на циклическое нагружение основываются на результатах теоретического и экспериментального исследования сопротивления трубопроводов переменному нагружению.

Предусматривается применение теории наибольших касательных напряжений для определения приведенных (эквивалентных) напряжений. Согласно этой теории определение приведенного напряжения в сечении трубопровода производится следующим образом. Подсчитываются главные напряжения по формулам:

$$\sigma = \frac{1}{2}(\sigma_\varphi + \sigma_z) \pm \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_\varphi - \sigma_z)^2 + 4\tau^2};$$

$$\sigma = \sigma_r,$$

где σ_φ — нормальное окружное напряжение, кгс/см^2;

σ_z — нормальное осевое напряжение, кгс/см^2;

σ_r — нормальное радиальное напряжение, кгс/см^2;

τ — касательное напряжение кручения, кгс/см^2.

Из трех полученных значений главных напряжений выбираются наибольшее и наименьшее (с учетом знака); они обозначаются σ_1 и σ_3 соответственно. Разность $\sigma_1 - \sigma_3$ и дает величину приведенного напряжения, по которому производится оценка прочности.

В РТМ приводятся все необходимые указания и формулы по определению составляющих напряженного состояния σ_φ, σ_z, σ_r, τ в элементе трубопровода. Подсчет приведенного напряжения должен выполняться по изложенной методике. В отдельных случаях приводятся формулы для приведенного напряжения в окончательном виде.

Наличие двух знаков (плюс, минус) перед слагаемым в формулах, приведенных в РТМ, означает, что расчет приведенного напряжения с использованием данной формулы должен производиться как при принятии знака «плюс», так и при принятии знака «минус». Для оценки прочности берется бо́льшее значение приведенного напряжения.

1.2. Условные обозначения:

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

$S_и$ — номинальная толщина стенки трубы, см;

r — средний радиус поперечного сечения ($r=(D_н - S_и)/2$), см;

R — радиус оси криволинейной трубы, см;

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

F — площадь поперечного сечения трубы, см^2;

W — момент сопротивления, см^3;

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

θ^* — угол между крайними сечениями криволинейной трубы, град;

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

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

$t_н$ — температура нагрева участка трубопровода, °С;

p — расчетное 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 $\left(\omega=1{,}82\frac{pR^2}{ES_и r}\right)$;

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;

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

$k_р^*$ — 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, возникающее под действием внутреннего давления, кгс/см^2;

σ^0_{zMN}, $\sigma^0_{zMN\,(ш)}$ — продольные напряжения, возникающие под действием изгибающего момента и осевой силы, кгс/см^2;

σ_φ — окружное (тангенциальное) напряжение в стенке трубы, кгс/см^2;

σ_z — осевое (продольное) напряжение в стенке трубы, кгс/см^2;

σ_r — радиальное напряжение в стенке трубы, кгс/см^2;

τ — напряжение кручения, кгс/см^2;

$(\sigma)_{tM}$ — температурные напряжения, возникающие вследствие перепада температуры по толщине стенки, кгс/см^2;

$(\sigma)_3$, $(\sigma)_{R_2}$, $(\sigma_a)_2$ — приведенные напряжения, кгс/см^2, [2];

$[\sigma_н]$ — номинальное допускаемое напряжение, кгс/см^2;

φ — коэффициент прочности продольного сварного стыка;

$k_п$ — коэффициент перегрузки;

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

$k_{из\,(ш)}$ — коэффициент местных изгибных напряжений в трубе от воздействия штуцера;

c^* — возможное утонение стенки трубы (сумма утонения, определяемого минусовым допуском полуфабриката, и утонений, возникающих вследствие технологических операций и коррозии), см.

2. ЭТАПЫ ПОЛНОГО РАСЧЕТА

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 ко-

торых выполняется на совместное действие определенного частного сочетания нагружающих факторов (табл. 1).

Как видно из табл. 1, для оценки прочности трубопровода требуется проведение расчетов только по этапам I, III и IIIа.

2.2. В этапах I, II, III и IIIа полного расчета внутреннее давление на участке трубопровода принимается равным максимальному рабочему давлению транспортируемой среды на этом участке (расчетному давлению [2]).

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 этапам III и IIIа в качестве температуры нагрева участка трубопровода принимается разность температур рабочего и холодного состояний, т. е. $t_н = t_р - t_х$. Значение коэффициента линейного расширения 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 «собственных» смещений концевых защемленных сечений (эти смещения вызываются температурным расширением корпуса оборудования).

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

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

2.8. Расчет по этапам I и II производится при модулях упругости материала, соответствующих рабочей температуре $t_р$, а расчет по этапам III, IIIа и IV — при модулях упругости, соответствующих температуре холодного состояния $t_х$. Значение модуля упругости следует принимать по данным Норм расчета на прочность элементов реакторов [2].

2.9. Коэффициент линейного расширения материала следует принимать по Нормам расчета на прочность элементов реакторов [2].

2.10. Расчеты по этапам I, II, IV выполняются с учетом соответствующих реакций промежуточных упругих опор, т. е. усилий их в рабочем (для этапов I, II) и холодном (для этапа IV) состоянии трубопровода *.

Расчет по этапам III и IIIа выполняется с учетом усилий сопротивления промежуточных упругих опор, возникающих в результате деформирования трубопровода при нагревании. Эти усилия (они равны приращениям нагрузок опор при переходе трубопровода из рабочего состояния в холодное) автоматически учитываются, если расчет выполняется по схеме нагреваемого трубопро-

* Имеются программы расчета трубопроводов на ЭЦВМ, предусматривающие определение рабочих нагрузок упругих опор, а также выбор пружин для них в ходе выполнения полного расчета [1].

Таблица 1

Этапы полного расчета

Обозначение этапа	Содержание расчета	Учитываемые нагружающие факторы	Назначение
I	Расчет на действие несамоуравновешенных нагрузок *	Внутреннее давление; весовая нагрузка	Оценка статической прочности
II	Расчет на совместное действие всех нагрузок для рабочего состояния	То же, и температурное расширение (самокомпенсация); «собственные» смещения защемленных концов; монтажная растяжка	Определение усилий воздействия трубопровода на оборудование
IIIа	Расчет на действие переменных нагрузок (самоуравновешенных и несамоуравновешенных)*	Внутреннее давление; температурное расширение; «собственные» смещения защемленных концов	Оценка усталостной прочности по критерию приспособляемости **
III	Расчет на действие переменных нагрузок с учетом концентрации напряжений и дополнительных напряжений от неправильности формы сечения	То же	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 нагрузок	Весовая нагрузка: монтажная растяжка	Определение усилий воздействия трубопровода на оборудование

* Несамоуравновешенные нагрузки образуются приложенными внешними поверхностными и массовыми силами. Самоуравновешенные нагрузки вызываются деформациями или смещениями при наличии связей, препятствующих свободному деформированию или кинематической подвижности; такие нагрузки возникают только в статически неопределимых конструкциях.

** Приспособляемость — приобретение конструкцией остаточных напряжений при первом нагружении, предотвращающих возникновение пластических деформаций при повторных нагружениях.

вода, опирающегося на упругие опоры; при этом в расчет вводятся фактические жесткости последних.

2.11. Воздействие на трубопровод опор скольжения и направляющих опор учитывается на всех этапах полного расчета. При этом на трубопровод в местах установки опор накладываются жесткие связи, исключающие недопустимые перемещения.

В настоящее время разрабатываются методы расчета внутренних усилий в трубопроводе с учетом сил трения, возникающих в опорах скольжения и в направляющих опорах. При применении таких методов силы трения следует учитывать в этапах II, III и IIIа полного расчета.

2.12. В случае когда усилия воздействия трубопровода на оборудование в холодном состоянии могут быть определены по п. 3.3, выполнение расчета по этапу IV не является обязательным.

2.13. Учет монтажной растяжки в расчетах по этапам II и IV рассмотрен в пп. 7.4, 7.7.

2.14. Если трубопровод эксплуатируется не в единственном варианте стационарного рабочего режима, то расчет его по этапам II, III, IIIа следует выполнять для всех режимов с введением соответствующих значений температуры нагрева $t_п$ и давления p.

Если предусматриваются циклы нагружения трубопровода* без полного охлаждения, то требуется выполнение расчета по этапу III и для таких циклов; при этом вместо величин $t_п$ и p принимаются соответствующие перепады температуры и давления цикла.

2.15. Возможны случаи, когда температурное расширение трубопровода в значительной мере опережает температурное расширение оборудования, вызывающее «собственные» смещения концов трубопровода (например, трубная обвязка массивного сосуда). Если при этом указанные «собственные» смещения существенно влияют на возникающие в трубопроводе усилия от самокомпенсации (при полном прогреве трубопровода и оборудования доля от этих смещений составляет более 20%), то требуется выполнение расчета его с анализом переходных состояний для нахождения максимальных напряжений (см. п. 3.3 [2]) и максимальных нагрузок на оборудование. При отсутствии необходимых данных для такого анализа можно расчет трубопровода выполнять по упрощенной схеме, гарантирующей получение результатов с погрешностью в безопасную сторону (например, исключение из расчета «собственных» смещений, если они направлены так, что снижают напряжения и усилия в трубопроводе, и т. п.).

Аналогичным образом следует рассматривать случаи, когда происходит существенно неодновременное температурное расширение всех участков (ответвлений) трубопровода.

---

* Под циклом нагружения трубопровода понимается повторяющийся режим его работы, включающий этапы повышения и понижения параметров рабочей среды и заключенные между ними установившиеся состояния.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБОРУДОВАНИЕ

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

3.2. Если в трубопроводе не применяется монтажная растяжка, то усилия воздействия его на оборудование в рабочем состоянии можно определять без выполнения специального расчета по этапу II. При этом применяется формула

$$X_{II} = X_I + X_{III}\frac{E_р}{E_х},$$

где X_{II} — значение какого-либо силового фактора (вертикальная сила, момент в горизонтальной плоскости и т. д.) из совокупности искомых усилий;

X_I, X_{III} — значения того же силового фактора, определяемые на этапах I и III (или IIIа) полного расчета.

3.3. В случае когда рабочие температуры всех участков трубопровода одинаковы, усилия воздействия на оборудование в холодном состоянии можно определять по формуле

$$X_{IV} = (X_{II} - X_I)\frac{E_х}{E_р} + X_I - X_{III},$$

где X_{IV} — значение какого-либо силового фактора из совокупности искомых усилий;

X_{II}, X_{III} — значения того же силового фактора, вычисленные на этапах II и III (или IIIа).

3.4. Наличие в стенке трубопровода плакирующего слоя должно учитываться при определении передаваемых им усилий воздействия на оборудование.

3.5. Определение усилий воздействия трубопровода на оборудование в особых случаях — см. п. 2.15.

3.6. 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. При этом требуется определение коэффициента податливости этих элементов.

4.2. Коэффициент податливости криволинейной трубы $k_р^*$ вычисляется как произведение коэффициента податливости $k_р$, определяемого без учета стесненности деформации ее концов от влияния примыкающих прямолинейных труб, на коэффициент ζ, учитывающий эту стесненность деформации, т. е.

$$k_p^* = \zeta k_p. \qquad (1)$$

4.3. Коэффициент податливости k_p определяется по формуле

$$k_p = 1 + \frac{1{,}125}{b}.$$

Величина b вычисляется по следующим формулам:

$$\left.\begin{aligned} a_1 &= 1{,}0100 + 1633{,}5\lambda^2 + 99{,}00\,\omega; \\ a_2 &= 1{,}0156 + 661{,}5\lambda^2 + 63{,}00\,\omega - \frac{0{,}2316}{a_1}; \\ a_3 &= 1{,}0278 + 204{,}2\lambda^2 + 35{,}00\,\omega - \frac{0{,}2197}{a_2}; \\ a_4 &= 1{,}0625 + 37{,}50\lambda^2 + 15{,}00\,\omega - \frac{0{,}1914}{a_3}; \\ b &= 0{,}1250 + 1{,}500\lambda^2 + 3{,}000\,\omega - \frac{0{,}09766}{a_4}. \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

Параметры λ и ω вычисляются по формулам:

$$\lambda = \frac{RS_и}{r^2}; \qquad \omega = 1{,}82\frac{p}{E}\cdot\frac{R^2}{S_н r}.$$

4.4. Можно определять коэффициент k_p также по графикам черт. 1 и по табл. 2. При использовании табл. 2 значение k_p для промежуточных значений λ и ω можно находить без применения интерполирования (берется значение k_p, соответствующее ближайшим указанным в таблице значениям λ и ω).

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

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

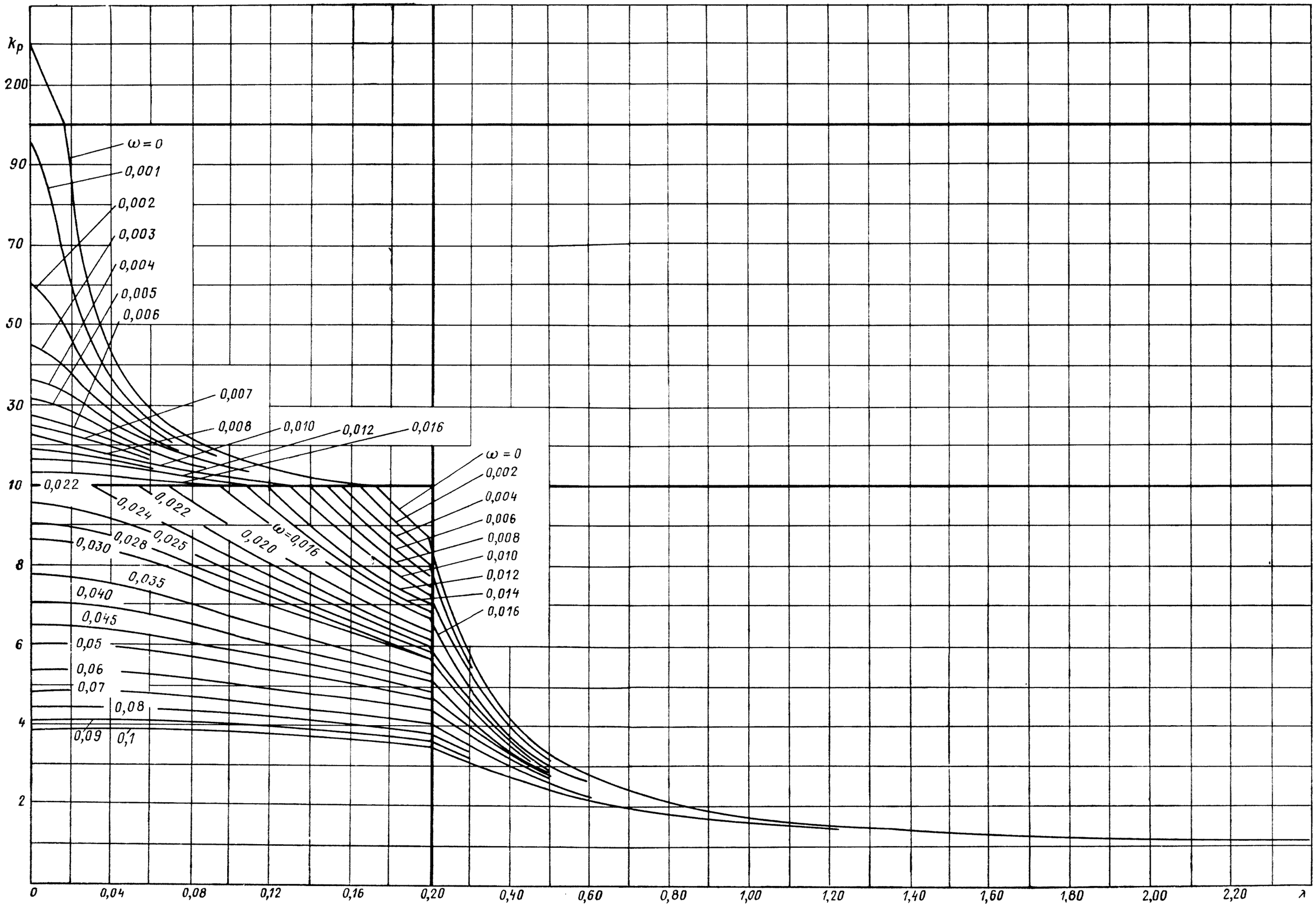
4.6. Значение коэффициента ζ можно определять по графикам черт. 2 в зависимости от геометрического параметра трубы λ, угла θ^* между крайними сечениями трубы и отношения радиусов R/r (черт. 3). Для промежуточных значений угла θ^* и отношения R/r значение ζ определяется по методу линейной интерполяции. При этом значение ζ для угла $\theta^*=0$ принимается по формуле (нижний график черт. 2)

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

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

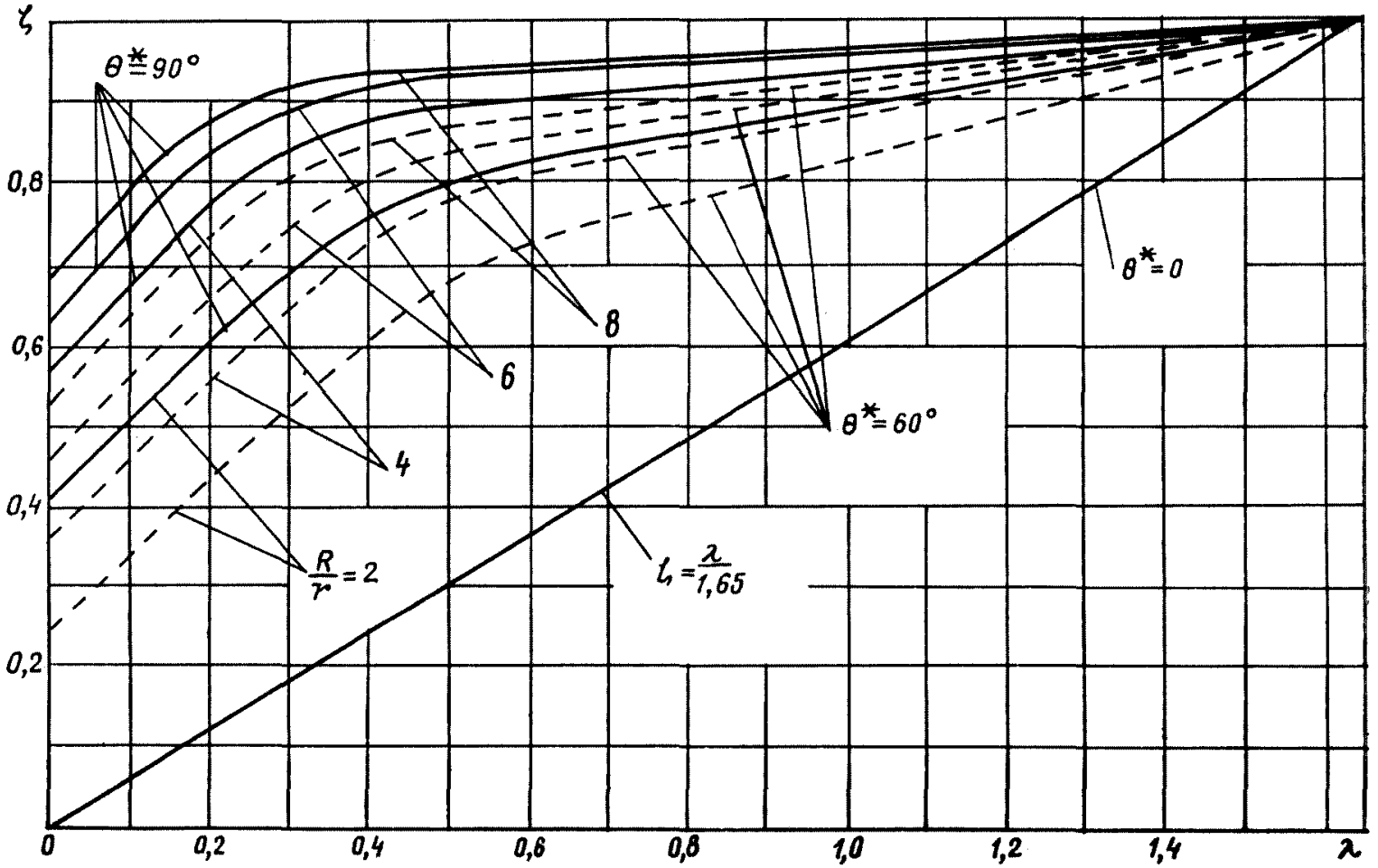
4.7. Влияние стесненности деформации концов можно не учитывать (принимается $\zeta=1$) для некоторых n криволинейных труб

Графики коэффициента k_p



Черт. 1

Графики коэффициента ζ



Черт. 2

Таблица 2

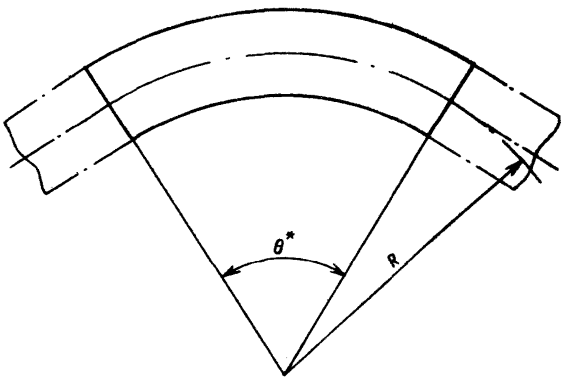
Значения коэффициента k_p

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	4,68	4,34	4,06	3,82	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
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	3,75	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	2,68	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	2,75	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

Продолжение табл. 2

λ	ω									
	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,90	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	1,65	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

Криволинейная труба



Черт. 3

(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 общей длине трубопровода, при подсчете которой длины криволинейных труб принимаются равными произведению истинной длины на коэффициент податливости $k_р$, т. е.

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

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

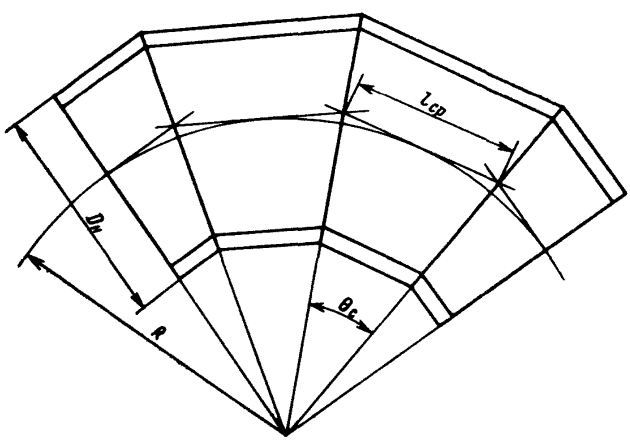
$L_{пр}$ — общая длина всех прямолинейных труб (отрезков) трубопровода.

Таблица 3

Значения коэффициента ζ

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

Колено, выполненное сваркой из прямых секторов (секторное колено)



Черт. 4

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

4.8. Для труб с $\lambda \geqslant 2{,}2$ можно принимать $k_р^* = 1$. Для труб, имеющих значение геометрического параметра $\lambda \geqslant 1{,}65$ или значение угла $\theta^* > 90°$, принимается $\zeta = 1{,}0$.

4.9. При расчете 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 (черт. 4) вычисляется по формуле

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

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

$\theta_с$ — угол между его крайними сечениями.

4.11. Для криволинейных труб с плакирующим слоем коэффициент $k_р^*$ определяется по приведенным указаниям в предположении, что стенка является однослойной и вся толщина ее выполнена из материала основного слоя.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ НА ЭТАПАХ ПОЛНОГО РАСЧЕТА

5.1. На этапах I, II, III и IIIа полного расчета 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), принимаемые для расчета напряжений, определяются расчетом трубопровода по соответствующему этапу. В расчетах по этапам III и IIIа значения указанных силовых факторов одинаковы (исключение см. п. 2.14).

5.2. Определение напряжений на этапе I полного расчета

5.2.1. На этапе I полного расчета трубопровода определяются приведенные напряжения $(\sigma)_3$ в его поперечных сечениях.

5.2.2. Для поперечных сечений прямолинейных и криволинейных труб составляющие (компоненты) напряженного состояния определяются по формулам:

где

$$\left.\begin{aligned} \sigma_\psi &= \sigma_{пр}, \\ \sigma_{пр} &= \frac{p\,[D_н - (S_и - c^*)]}{2\varphi\,(S_и - c^*)}; \\ \sigma_z &= \pm k_п \left(\frac{0{,}8\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{W} + \frac{|N_z|}{F} \right) + \frac{1}{2}\sigma_\psi; \\ \sigma_r &= 0; \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

$$\tau = \frac{k_п M_z}{2W}, \qquad (6)$$

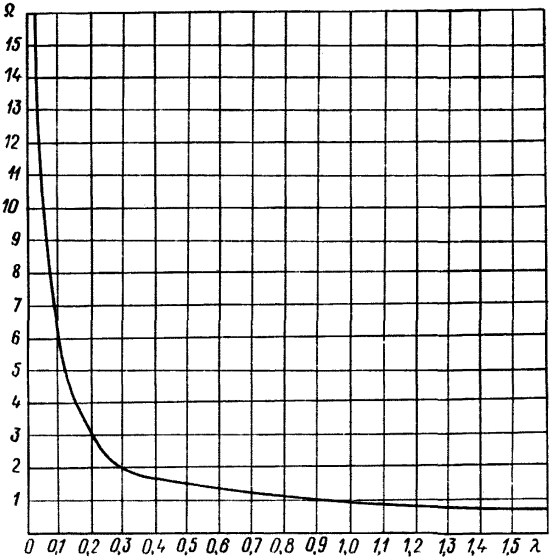
где

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

$$F = \pi S_и (D_н - S_и).$$

Коэффициент прочности сварного стыка φ принимается в соответствии с Нормами расчета на прочность элементов реакторов [2]. При отсутствии продольного или спирального сварного шва $\varphi = 1$.

График коэффициента Ω



Черт. 5

Значение возможного утонения стенки c^* принимается по соответствующим техническим условиям на изготовление и руководящим указаниям по определению повреждения от коррозии.

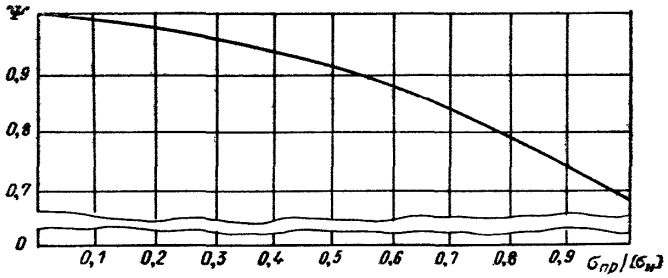
Коэффициент перегрузки $k_п$ принимается по п. 5.5.2.

5.2.3. Для криволинейных труб, геометрический параметр которых удовлетворяет условию $\lambda \leqslant 1{,}4$, дополнительно к определению приведенного напряжения $(\sigma)_з$ при использовании формул п. 5.2.2 вычисляется приведенное напряжение по формуле

$$(\sigma)_з = k_п \frac{\Omega}{\Psi} \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{W}.$$

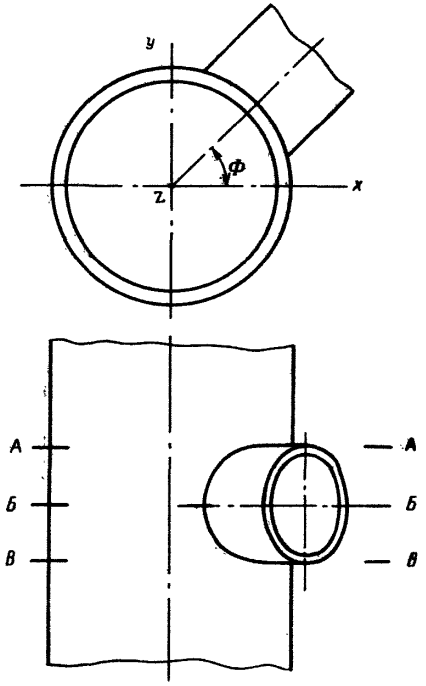
Значения величин Ω и Ψ принимаются по графикам черт. 5 и 6. Значение $\sigma_{пр}$ определяется по формуле (5), а значение $[\sigma_н]$ прини-

График коэффициента Ψ



Черт. 6

Тройниковый узел (труба со штуцером)



Черт. 7

мается по п. 6.3. При $\lambda \geqslant 0{,}05$ значение Ω можно определять также по формуле

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

5.2.4. Для трубы с боковым отверстием, в которое вваривается штуцер (т. е. для тройникового узла), приведенное напряжение определяется с учетом «выворачивающего» действия штуцера. Расчет выполняется для трех сечений трубы: *А—А, Б—Б, В—В* (черт. 7). Приводятся формулы для подсчета составляющих напряженного состояния:

для сечений $A-A$ и $B-B$

$$\sigma_\varphi = \sigma_{пр};$$

$$\sigma_z = k_п\left(\sigma^0_{zMN} \pm 0{,}7\ \sigma^0_{zMN(ш)}\, k_{из(ш)}\right) + \frac{1}{2}\sigma_{пр},$$

для сечения $Б-Б$

$$\sigma_\varphi = \sigma_{пр} \pm 0{,}7\, k_п\, \sigma^0_{zMN(ш)}\, k_{из(ш)};$$

$$\sigma_z = k_п\, \sigma^0_{zMN} + \frac{1}{2}\sigma_{пр}.$$

Касательное напряжение в указанных сечениях подсчитывается по формуле (6), а радиальное напряжение $\sigma_r = 0$.

Подсчет напряжений в сечениях $A-A$ и $B-B$ производится по силовым факторам, действующим в соответствующем сечении. Определение же напряжений в сечении $Б-Б$ производится дважды: в первом случае принимаются силовые факторы сечения $A-A$, во втором — силовые факторы сечения $B-B$; для оценки прочности принимается большее значение $(\sigma)_3$.

Напряжение σ^0_{zMN} (продольное напряжение в трубе) определяется по формуле

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

Силовые факторы M_x, M_y, N_z считаются положительными, если направлены так, как показано на черт. 8. Угол Φ определяет положение отверстия (черт. 7).

Напряжение $\sigma^0_{zMN(ш)}$ (продольное напряжение в трубе $D_{н.ш} \times S_{и.ш}$ в месте состыковки со штуцером, черт. 9) определяется по формуле

$$\sigma^0_{zMN(ш)} = \frac{\sqrt{M_x^2 + M_y^2}}{W} + \frac{|N_z|}{F},$$

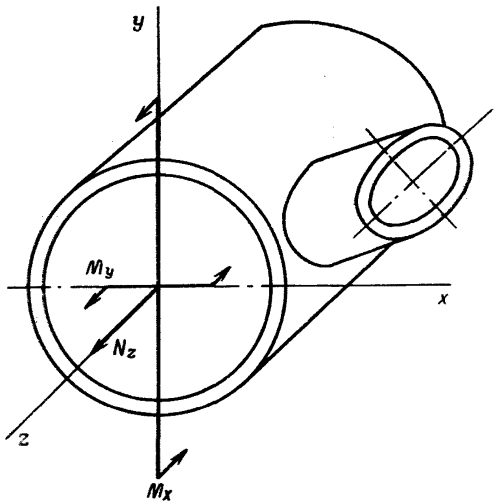
где входящие в формулу величины относятся к указанной трубе.

Коэффициент местных напряжений, вызываемых воздействием штуцера, для сечений $A-A$ и $B-B$ вычисляется по формуле

$$k_{из(ш)} = \frac{(D_{н.ш} - S_{и.ш})\, S_{и.ш}}{4\,(S_и - c^*)^2} \ln\frac{D_н - S_и}{S'_ш}.$$

При определении напряжения σ_ψ в сечении *Б — Б* коэффициент $k_{из\,(ш)}$ подсчитывается по той же формуле, но с подстановкой $S''_ш$ вместо $S_ш'$ (черт. 9).

Силовые факторы в поперечном сечении тройникового узла



Черт. 8

Напряжение $\sigma_{пр}$ определяется по формуле (5).

Коэффициент перегрузки $k_п$ принимается по п. 5.5.2.

5.2.5. Для равнопроходного или почти равнопроходного тройникового узла (отношение большего наружного диаметра к меньшему не более 1,3) дополнительно к расчету $(\sigma)_3$ с использованием формул п. 5.2.4 вычисляется приведенное напряжение по формуле п. 5.2.3, причем геометрический коэффициент трубы λ в данном случае определяется как отношение толщины стенки к среднему радиусу поперечного сечения ($\lambda = S_и/r$).

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

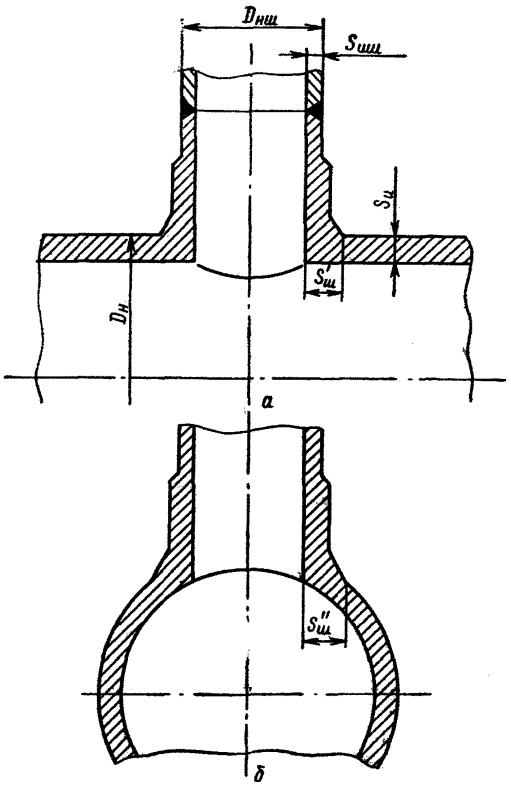
5.3. Определение напряжений на этапе IIIа полного расчета

5.3.1. На этапе IIIа полного расчета определяются приведенные напряжения $(\sigma)_{R_2}$, соответствующие размаху нагрузок при переходе трубопровода из холодного состояния в рабочее и обратно.

5.3.2. Для прямолинейных труб и криволинейных труб с $\lambda \geqslant 1{,}4$ составляющие напряженного состояния определяются по форму-

лам п. 5.2.2, но коэффициент 0,8 перед знаком радикала в формуле для σ_z опускается.

Тройниковый узел



а — продольный разрез; *б* — поперечный разрез

Черт. 9

5.3.3. Для криволинейных труб с $\lambda<1,4$ определение $(\sigma)_{R_2}$ производится вычислениями по следующим четырем формулам:

$$(\sigma)_{R_2}=\frac{1}{W}\sqrt{[(|M_x|\gamma_m+|M_y|\beta_m)k_н+0{,}5W\sigma_{пр}]^2+(k_н M_z)^2};$$

$$(\sigma)_{R_2}=\frac{1}{W}\sqrt{[(|M_x|\beta_m+|M_y|\gamma_m)k_н+0{,}5W\sigma_{пр}]^2+(k_н M_z)^2};$$

$$(\sigma)_{R_2}=\frac{1}{W}\sqrt{[|M_x|\gamma_m k_н+WB\sigma_{пр}]^2+(k_н M_z)^2};$$

$$(\sigma)_{R_2} = \frac{1}{W}\sqrt{[|M_y|\gamma_m k_п + WB\sigma_{пр}]^2 + (k_п M_z)^2}.$$

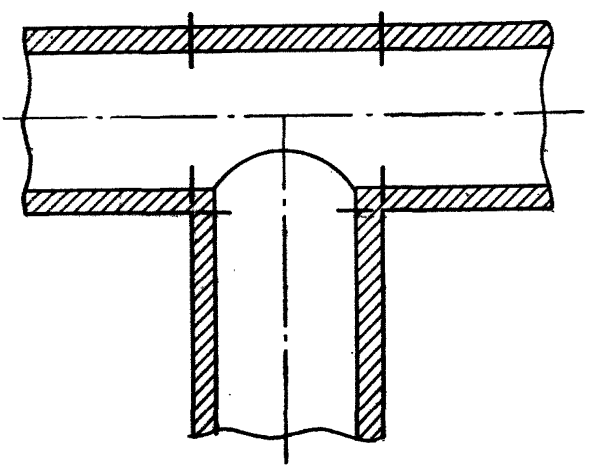
Для оценки прочности берется большее из четырех значений *. Коэффициенты γ_m и β_m определяются по п. 5.5.1. Напряжение $\sigma_{пр}$ определяется по формуле (5). Коэффициент перегрузки принимается по п. 5.5.2. Коэффициент B определяется по формуле

$$B = \frac{2R - r}{2(R - r)},$$

где R — радиус оси трубы (черт. 3);

r — средний радиус поперечного сечения.

Расчетные сечения тройникового узла



Черт. 10

Для криволинейных труб, изготовленных методом гнутья, $B = 1{,}0$.

5.3.4. Для трубы с боковым отверстием (для тройникового узла) напряжение $(\sigma)_{R_1}$ определяется в сечениях $A — A$, $Б — Б$ и $B — B$ (черт. 7). При этом для подсчета составляющих напряженного состояния применяются следующие формулы:

для сечений $A — A$ и $B — B$

$$\sigma_ф = 0{,}5\,\alpha_э \sigma_{пр};$$

$$\sigma_z = k^*_п\left(\sigma^0_{zMN} \pm \sigma^0_{zMN(ш)} k_{из(ш)}\right) + \frac{1}{2}\sigma_{пр};$$

для сечения $Б — Б$

$$\sigma_ф = \sigma_{пр} \pm k_п \sigma^0_{zMN(ш)} k_{из(ш)};$$

---

* Более точный расчет напряжений в криволинейной трубе может быть выполнен по методике, приведенной в приложении 2.

$$\sigma_z = 1{,}5 k_{\text{п}} \sigma^0_{zMN} + \frac{1}{2} \sigma_{\text{пр}}.$$

Если

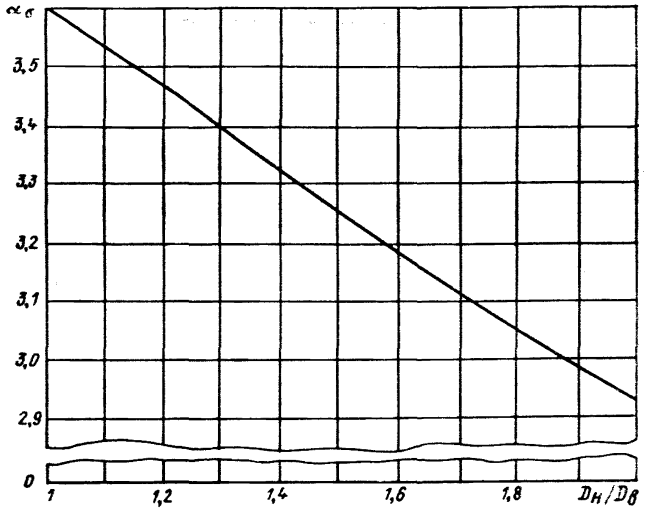
$$\sigma^0_{zMN} \pm \sigma^0_{zMN\,(\text{ш})} k_{\text{из}\,(\text{ш})} > 0$$

и

$$\frac{\sigma^0_{zMN} \pm \sigma^0_{zMN\,(\text{ш})} k_{\text{из}\,(\text{ш})}}{\sigma_{\text{пр}}} < (0{,}5\,\alpha_{\text{э}} - 1) \frac{k_{\text{п}}}{k^2_{\text{п}} + 1},$$

то принимается $k^*_{\text{п}} = \frac{1}{k_{\text{п}}}$; в других случаях $k^*_{\text{п}} = k_{\text{п}}$.

График коэффициента α_σ;



Черт. 11

Коэффициент концентрации напряжений $\alpha_{\text{э}}$ определяется по формуле

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

или по черт. 11.

Здесь $D_{\text{в}}$ — внутренний диаметр трубы, $D_{\text{в}} = D_{\text{н}} - 2S_{\text{и}}$;

$D_{\text{н}}$ — наружный диаметр трубы.

Касательное напряжение τ в указанных сечениях подсчитывается по формуле (6). Радиальное напряжение принимается $\sigma_r = 0$.

Силовые факторы для подсчета напряжений принимаются в соответствии с указанием п. 5.2.4.

Величины $\sigma_{пр}$, σ^0_{zMN}, $\sigma^0_{zMN(ш)}$, $k_{из(ш)}$ подсчитываются по тем же формулам, что и в п. 5.2.4.

Коэффициент перегрузки $k_п$ принимается по п. 5.5.2.

5.3.5. Для равнопроходного или почти равнопроходного тройникового узла (отношение большего наружного диаметра к меньшему не более 1,3) дополнительно к расчету по п. 5.3.4 определяется эквивалентное напряжение по формуле

$$(\sigma)_{R_2} = \frac{1}{W}\sqrt{(k_п \gamma_m \sqrt{M_x^2 + M_y^2} + W\sigma_{пр})^2 + (k_п M_z)^2},$$

причем коэффициент γ_m определяется по п. 5.5.1 в зависимости от геометрического параметра λ, определяемого в данном случае как отношение толщины стенки к среднему радиусу поперечного сечения ($\lambda = S_н/r$), и параметра ω, определяемого по формуле

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

Расчет по настоящему пункту выполняется для сечений всех трех трубопроводных участков, сходящихся в данном тройниковом узле (см. черт. 10).

5.4. Определение напряжений на этапе III полного расчета

5.4.1. На этапе III полного расчета определяются амплитуды $(\sigma_a)_2$ приведенных напряжений, соответствующих размаху нагрузки при переходе трубопровода из холодного состояния в рабочее и обратно. Учитывается концентрация напряжений на кромке отверстия (в тройниках), а также дополнительные напряжения от неправильности формы поперечного сечения (в криволинейных трубах).

5.4.2. Для поперечных сечений прямолинейных труб и криволинейных труб с $\lambda > 1{,}0$ составляющие напряженного состояния определяются так же, как требуется по п. 5.3.2, но с уменьшением в два раза (для получения амплитудных значений приведенных напряжений).

5.4.3. Для криволинейных труб (при любом значении λ) вычисление амплитуды $(\sigma_a)_2$ производится по следующим формулам:

$$(\sigma_a)_2 = \frac{1}{2W}\sqrt{[|(0{,}7k_п^* M_x + 2{,}5M_э)|\gamma_m + |0{,}7k_п M_y|\beta_m + 0{,}5W\sigma_{пр}]^2 + (k_п M_z)^2};$$

$$(\sigma_a)_2 = \frac{1}{2W}\sqrt{[|(0{,}7k_п^* M_x + 2{,}5M_э)|\beta_m + |0{,}7k_п M_y|\gamma_m + 0{,}5W\sigma_{пр}]^2 + (k_п M_z)^2};$$

$$(\sigma_a)_2 = \frac{1}{2W}\sqrt{[|(0{,}7k_п^* M_x + 2{,}5M_э)|\gamma_m + BW\sigma_{пр}]^2 + (k_п M_z)^2};$$

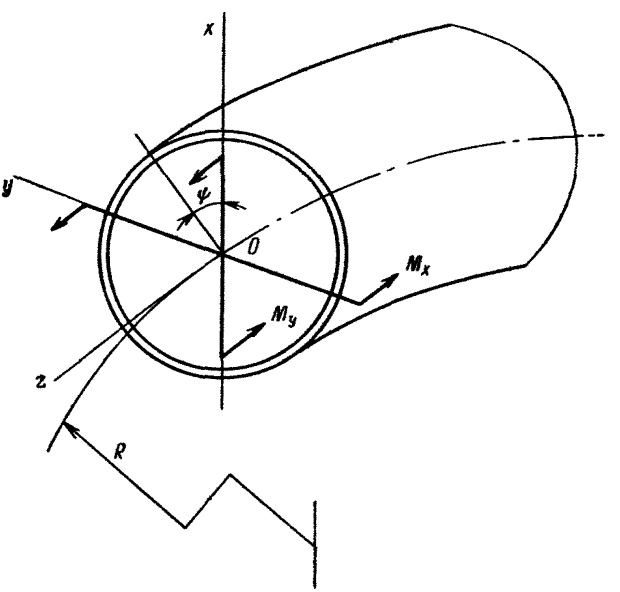
$$(\sigma_a)_2 = \frac{1}{2W}\sqrt{(|0{,}7k_п M_y|\gamma_m + BW\sigma_{пр})^2 + (k_п M_z)^2}.$$

Для оценки прочности берется большее из четырех значений. Величина $M_э$ определяется по формуле

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

где a — начальная эллиптичность (овальность) поперечного сечения *, %; значение ее принимается согласно п. 5.4.4.

Изгибающие моменты в сечении криволинейной трубы



Черт. 12

Изгибающий момент M_x действует в плоскости оси криволинейной трубы, а момент M_y — в плоскости, перпендикулярной к плоскости оси трубы (черт. 12). Момент M_x считается положительным, если направлен в сторону увеличения кривизны оси трубы.

Коэффициент $k_п$ принимается согласно п. 5.5.2.

При $M_x > 0$ и $\frac{|M_э|}{M_x} > 0{,}14\left(k_п + \frac{1}{k_п}\right)$ принимается $k_п^* = \frac{1}{k_п}$; в остальных случаях $k_п^* = k_п$.

Коэффициенты γ_m и β_m определяются по п. 5.5.1. Напряжение $\sigma_{пц}$ подсчитывается по формуле (5).

---

* Предполагается, что большая ось эллипса перпендикулярна плоскости колена.

Коэффициент B определяется по п. 5.3.3.

5.4.4. В том случае, когда отсутствуют данные о фактической величине начальной эллиптичности сечений криволинейных труб, расчет напряжений в них по п. 5.4.3 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 эллиптичности $a \leqslant 2\%$, то в расчете напряжений она не учитывается (в расчетных формулах принимается $a=0$).

5.4.5. Вычисление напряжения $(\sigma_a)_2$ в криволинейной трубе по п. 5.4.3 с учетом неправильности формы поперечного сечения выполняется в предположении, что искаженная форма сечения является строго эллиптической. Это потребовало увеличения запаса прочности, что выражается в определении $(\sigma_a)_2$ с некоторым завышением. Если оценка прочности по полученному таким образом напряжению $(\sigma_a)_2$ дает неудовлетворительный результат, то можно применить уточненную методику расчета, изложенную в приложении 2. Применение этой методики позволяет оценить прочность колена без излишних запасов, однако требует выявления действительной формы отступления поперечного сечения.

5.4.6. Для трубы с боковым отверстием (для тройникового узла) производится подсчет напряжения $(\sigma_a)_2$ в сечениях $A-A$, $Б-Б$, $B-B$ (см. черт. 7). При этом используются следующие формулы для подсчета составляющих напряженного состояния (амплитудных значений):

для сечений $A-A$ и $B-B$

$$\sigma_\psi = 0{,}35\,\alpha_э\,\sigma_{пр};$$

$$\sigma_z = \frac{1}{2}\left[k_п^*\left(\sigma^0_{zMN} \pm \sigma^0_{zMN(ш)}\,k_{из(ш)} + 0{,}35\sigma_{пр}\right)\right];$$

при $\sigma^0_{zMN} \pm \sigma^0_{zMN(ш)}\,k_{из(ш)} > 0$ и $\dfrac{\sigma^0_{zMN} \pm \sigma^0_{zMN(ш)}\,k_{из(ш)}}{\sigma_{пр}} < 0{,}7(\alpha_э - 1)\times$ $\times \dfrac{k_п}{k_п^2+1}$ принимается $k_п^* = \dfrac{1}{k_п}$; в остальных случаях $k_п^* = k_п$;

для сечения $Б-Б$

$$\sigma_\psi = \frac{1}{2}\left(\sigma_{пр} \pm k_п\,\sigma^0_{zMN(ш)}\,k_{из(ш)}\right);$$

$$\sigma_z = \frac{1}{2}\left(3k_п\,\sigma^0_{zMN} + \frac{1}{2}\sigma_{пр}\right).$$

Касательное напряжение τ в указанных сечениях определяется по формуле (6), но с уменьшением в два раза. Радиальное напряжение принимается $\sigma_r=0$.

Силовые факторы для подсчета напряжений принимаются в соответствии с указанием п. 5.2.4.

Величины $\sigma_{пр}$, σ^0_{zMN}, $\sigma^0_{zMN\,(ш)}$, $k_{из\,(ш)}$ определяются таким же образом, как требуется согласно п. 5.2.4.

Коэффициент концентрации напряжений α_σ определяется по п. 5.3.4.

Коэффициент перегрузки принимается по п. 5.5.2.

5.4.7. Для равнопроходного или почти равнопроходного тройникового узла (отношение большего наружного диаметра к меньшему не более 1,3) определяются также приведенные напряжения для сечения всех трех участков, сходящихся в тройниковом узле (см. черт. 10), по формуле

$$(\sigma_a)_2 = \frac{1}{2W}\sqrt{(0{,}7\,k_п\,\gamma_m\sqrt{M_x^2+M_y^2}+W\sigma_{пр})^2+(k_п M_z)^2}\,.$$

Определение входящих сюда величин выполняется так же, как при расчете по п. 5.3.5.

5.5. Определение коэффициентов, входящих в формулы для подсчета напряжений

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

$$\gamma_m = 0{,}75\lambda \sum_{i=2,\,4,\ldots}^{10} A_{i2}\,(1-i^2);$$

$$\beta_m = k_р + 1{,}5 \sum_{i=2,\,4,\ldots}^{10} \frac{A_{i2}}{i}\,,$$

где

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

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

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

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

$$A_{10.2} = \frac{0{,}4812}{a_1} A_{82}.$$

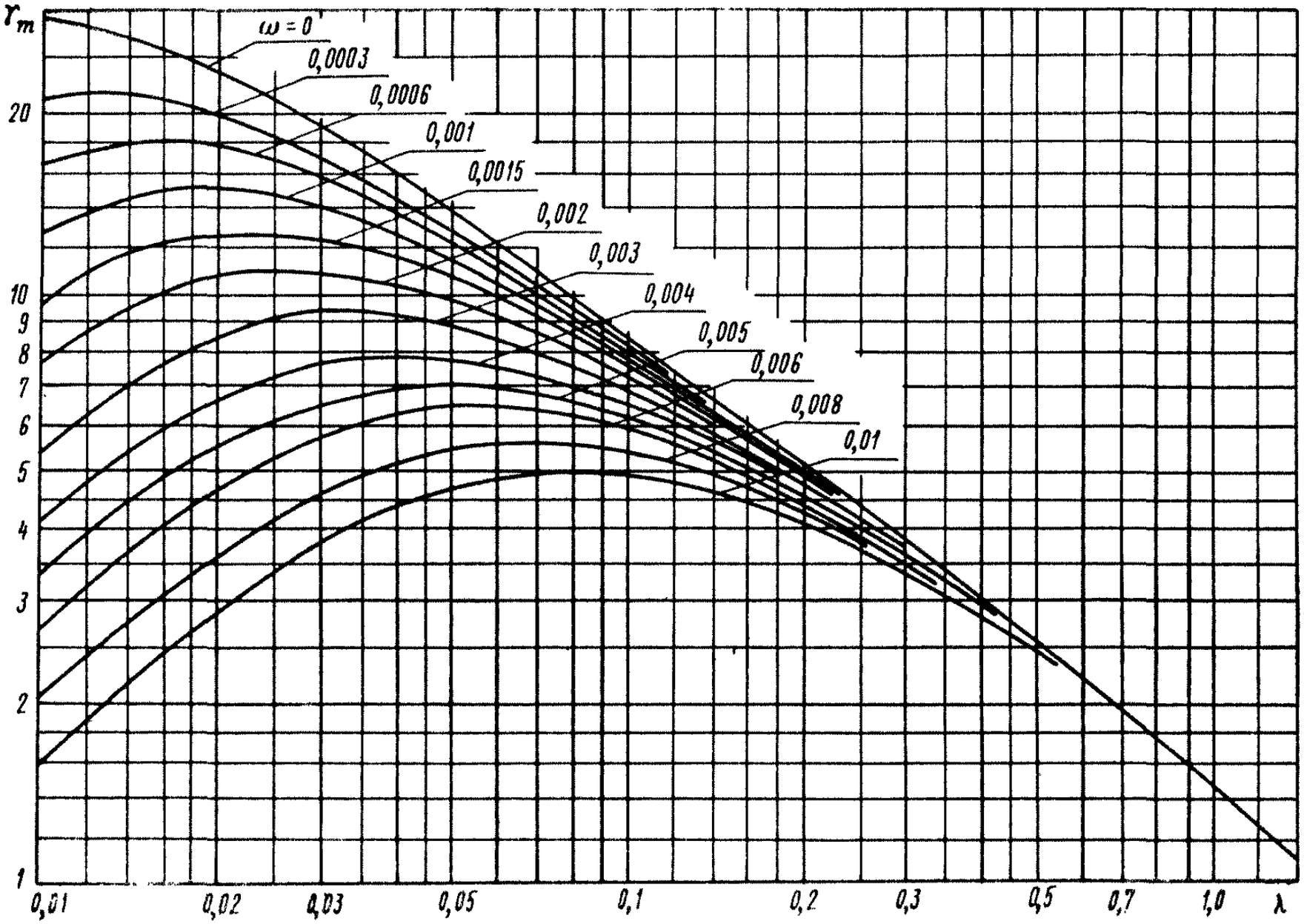
Величины $k_р$, a_1, a_2, a_3, a_4, b определяются формулами (1) и (2).

Коэффициенты γ_m и β_m можно принимать также по графикам черт. 13 и 14.

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

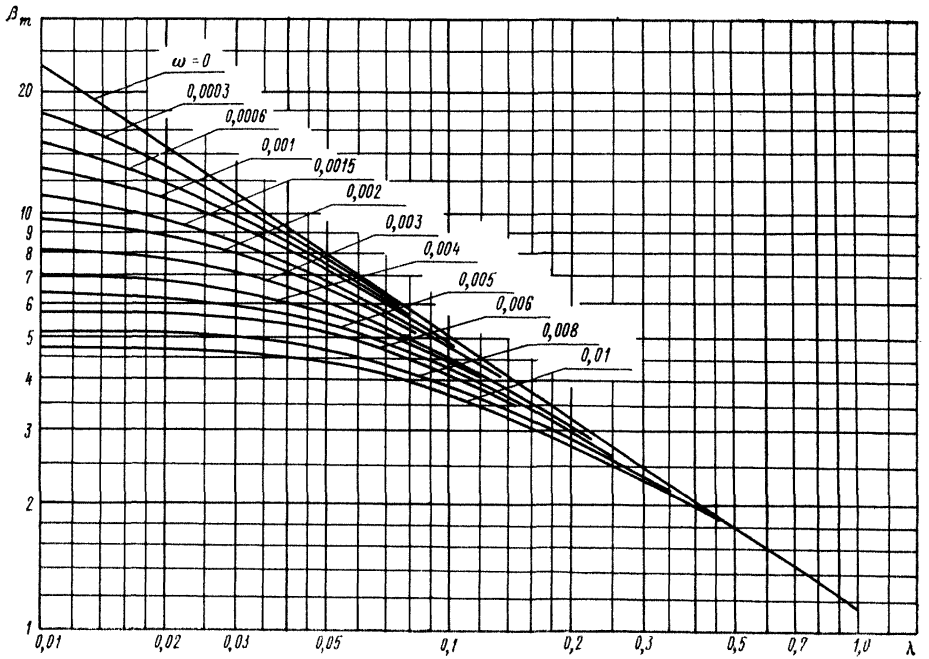
$$\gamma_m = 1{,}89\lambda^{-\frac{2}{3}}. \qquad (7)$$

Графики для определения коэффициента γ_m



Черт. 13

Графики для определения коэффициента β_m



Черт. 14

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

$$\beta_m = 1{,}13\lambda^{-\frac{2}{3}}. \qquad (8)$$

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

Применение формул (7) и (8) при значениях λ и ω, выходящих за пределы указанных интервалов, дает значения γ_m и β_m с значительной ошибкой в сторону завышения.

5.5.2. Коэффициент перегрузки принимается $k_п = 1{,}4$. При этом предполагается, что расчет трубопровода выполняется без существенных упрощений (учтены все ответвления и опоры и т. п.), а монтаж его осуществляется по соответствующим инструкциям, апробированным компетентными организациями.

5.6. Учет некоторых конструктивных особенностей

5.6.1. Для труб с плакирующим слоем определение напряжений согласно разделу 5 производится без учета указанного слоя *.

5.6.2. Напряжение в секторных коленах с числом секторов более двух можно определять по приводимым в разделе 5 указаниям для криволинейных труб.

Расчет напряжений в секторных коленах на этапе III полного расчета следует выполнять при увеличении расчетных изгибающих моментов M_x и M_y на 25%. Если секторное колено выполнено из трубы с продольным или спиральным сварным швом, то в расчете его на этапе III напряжение $\sigma_{пр}$ подсчитывается по формуле (5), но с уменьшением коэффициента прочности φ на 20%.

6. КРИТЕРИИ ПРОЧНОСТИ ДЛЯ ЭТАПОВ ПОЛНОГО РАСЧЕТА

6.1. Приведенные напряжения, вычисляемые на этапе I полного расчета трубопровода, должны удовлетворять условию

$$(\sigma)_3 \leqslant 1{,}3\,[\sigma_н].$$

6.2. Приведенные напряжения, определяемые на этапе IIIа полного расчета, должны удовлетворять условию

$$(\sigma)_{R_2} \leqslant 2{,}5\,[\sigma_н].$$

6.3. Величина допускаемого напряжения $[\sigma_н]$ принимается по данным Норм расчета на прочность элементов реакторов [2] в зависимости от рабочей температуры и марки материала.

6.4. Если все циклы нагружения трубопровода одинаковы, то амплитуды приведенных напряжений, определяемые на этапе III полного расчета, должны удовлетворять условию

$$(\sigma_a)_2 \leqslant \varphi_c\,[\sigma_a^*],$$

---

* Внутренние силовые факторы, по которым подсчитываются напряжения, можно определять без учета плакирующего слоя.

где коэффициент φ_c, зависящий от условий выполнения сварки, и допускаемая амплитуда напряжений $[\sigma_a^*]$ принимаются в соответствии с требованиями Норм расчета на прочность элементов реакторов [2] *.

В том случае, когда циклы нагружения трубопровода не одинаковы (циклы имеют различные значения $(\sigma_a)_2$), следует применять условие прочности

$$\sum \frac{N_i}{[N]_i} \leqslant 1,$$

где N_i — число циклов i-го режима с напряжением $(\sigma_a)_{2\,i}$;

$[N]_i$ — допустимое число циклов нагружения, определяемое в зависимости от амплитуды $(\sigma_a)_{2\,i}$.

Суммирование по приведенной формуле должно охватывать все циклы нагружения трубопровода.

7. ПРИМЕНЕНИЕ И УЧЕТ МОНТАЖНОЙ РАСТЯЖКИ

7.1. Монтажная (холодная) растяжка применяется в низкотемпературных трубопроводах для уменьшения передаваемой ими нагрузки на оборудование в рабочем состоянии.

7.2. Применение монтажной растяжки не является обязательным. Вопрос о целесообразности применения монтажной ростяжки, а также о ее величине и месте выполнения должен решаться с учетом конкретных особенностей трубопровода.

Возможны случаи, когда применение монтажной растяжки дает отрицательный эффект [5].

7.3. Рекомендуется назначать величину монтажной растяжки не более 60% от воспринимаемого (компенсируемого) температурного расширения (с учетом «собственных» смещений защемленных концов).

7.4. Учет монтажной растяжки в расчете трубопровода допускается лишь в том случае, когда гарантируется выполнение ее в строгом соответствии с данными проекта.

Монтажная растяжка учитывается на этапах II и IV полного расчета.

7.5. При применении монтажной растяжки с негарантируемым качеством выполнения рекомендуется производить расчет трубопровода без учета монтажной растяжки. При этом требуется, однако, обосновывать положительное значение применяемой монтажной растяжки.

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

7.7. Учет монтажной растяжки в расчете трубопровода производится путем введения соответствующих взаимных смещений сты-

---

* Сварные соединения труб из разнородных сталей в РТМ не рассматриваются.

куемых сечений (смещений стыкуемых сечений при выполнении растяжки).

8. РАСЧЕТ С УЧЕТОМ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ

8.1. Расчет трубопровода на прочность с учетом нестационарных температурных режимов выполняется аналогично расчету по этапу III, но с введением температурных напряжений, обусловленных возникающим перепадом температуры по толщине стенки. Для определения амплитуд приведенных напряжений цикла, т. е. амплитуд $(\sigma_a)_2$, требуется выполнение расчетов напряжений в трубопроводе для промежуточных (текущих) температурных состояний (исключение см. п. 8.9).

8.2. Определение и учет температурных напряжений от осевого (продольного) градиента температуры в РТМ не рассматривается из-за отсутствия данных для разработки достаточно надежных рекомендаций. Необходимость учета таких напряжений возникает лишь в особых случаях: для зоны сварного стыка труб из разнородных материалов, для узла сопряжения трубопроводов с различными рабочими температурами и т. п. В других случаях возникновение больших градиентов температуры в стенке трубопровода в осевом направлении должно предотвращаться проектными и конструкторскими решениями: недопущением сочленения сваркой труб с сильно отличающимися толщинами стенок; осуществлением плавных переходов в местах, где необходимо изменить толщину стенки; выполнением патрубков и штуцеров с утоненной стенкой достаточной протяженности на конце и т. п.

8.3. Текущие температурные напряжения $(\sigma)_{tM}$ на внутренней и наружной поверхностях элементов трубопровода рекомендуется определять по РТМ 24.038.11—72 [4] *.

При наличии плакирующего слоя в стенке его следует учитывать при определении температурных напряжений со своими физико-механическими свойствами. При этом рекомендуется применять методику расчета, приведенную в приложении РТМ 24.038.11—72 [4].

8.4. Текущие значения составляющих напряженного состояния определяются по следующим формулам **:

для прямолинейных труб и криволинейных труб с $\lambda \geqslant 1{,}4$

$$\sigma_\psi = \sigma_{пр} + (\sigma)_{tM};$$

$$\sigma_z = \sigma_{zMN} + \frac{1}{2}\sigma_{пр} + (\sigma)_{tM};$$

для трубы с боковым отверстием (для тройникового узла) в сечениях $A - A$ и $B - B$ (см. черт. 7)

$$\sigma_\psi = 0{,}7\,\alpha_\sigma\,\sigma_{пр} + (\sigma)_{tM};$$

---

* В РТМ 24.038.11—72 указанные напряжения обозначены σ_θ.

** Приводятся формулы для полных значений напряжений, а не для амплитудных значений.

$$\sigma_z = \sigma^0_{zMN} \pm \sigma^0_{zMN\,(ш)} k_{из\,(ш)} + 0{,}35\sigma_{пр} + (\sigma)_{tM};$$

для трубы с боковым отверстием в сечении $Б — Б$ (см. черт. 7)

$$\sigma_\varphi = \sigma_{пр} \pm \sigma^0_{zMN\,(ш)} k_{из\,(ш)} + (\sigma)_{tM};$$

$$\sigma_z = 3\sigma^0_{zMN} + \frac{1}{2}\sigma_{пр} + (\sigma)_{tM}.$$

При расчете напряжений для наружной поверхности величина σ_{zMN} подсчитывается по формуле

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

величины σ^0_{zMN}, $\sigma^0_{zMN\,(ш)}$, $k_{из\,(ш)}$ определяются по п. 5.2.4, коэффициент α_σ — по п. 5.3.4. Касательное напряжение τ для наружной поверхности определяется по формуле (6), но при $k_п = 1$. Силовые факторы, по которым подсчитываются указанные напряжения, должны соответствовать данной текущей средней температуре стенки; определение ее рекомендуется производить по указанию РТМ [4]. При подсчете σ_{zMN}, σ^0_{zMN}, τ для внутренней поверхности вместо момента сопротивления W принимается величина

$$\frac{D_н}{D_в} W,$$

где $D_в$ — внутренний диаметр трубы. При определении напряжений в сечениях трубы с отверстием силовые факторы принимаются в соответствии с указанием п. 5.2.4.

Приведенное напряжение от внутреннего давления $\sigma_{пр}$ определяется по формуле (5), но при введении текущего значения давления.

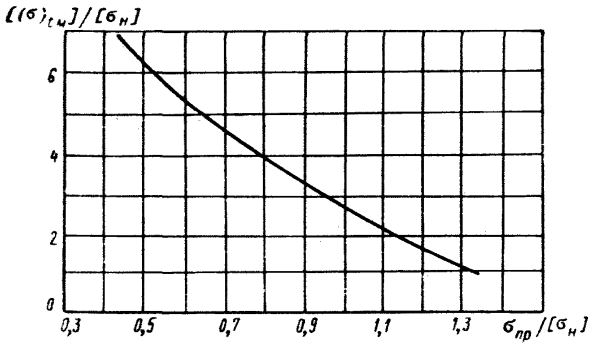
Радиальное напряжение принимается $\sigma_r = 0$ для наружной поверхности и $\sigma_r = -p$ (здесь p — текущее давление) для внутренней поверхности.

8.5. Для определения амплитуды приведенных напряжений $(\sigma_a)_2$ по текущим составляющим напряженного состояния должна применяться методика, приведенная в п. 3.3 Норм [2]. Подсчет напряжений $(\sigma_a)_2$ производится для внутренней и наружной поверхностей элемента трубопровода.

8.6. Расчет напряжений с учетом температурных составляющих в криволинейных трубах с $\lambda < 1{,}4$ рекомендуется производить по методике, изложенной в приложении 2, но с добавлением к осевым и окружным нормальным напряжениям слагаемого $(\sigma)_{tM}$. Если в расчете криволинейной трубы требуется учитывать неправильность формы поперечного сечения (см. пп. 5.4.4, 5.4.5), то расчет по настоящему пункту выполняется при любом значении коэффициента λ.

8.7. Нестационарные температурные напряжения на внутренней или наружной поверхности элементов трубопровода $(\sigma)_{tM}$ не должны превосходить по абсолютной величине допускаемого значения $[(\sigma)_{tM}]$, принимаемого по графику черт. 15.

График для определения допускаемых температурных напряжений



Черт. 15

8.8. Оценка усталостной прочности трубопровода по напряжениям $(\sigma_a)_2$, учитывающим нестационарные температурные напряжения, производится в соответствии с п. 6.4, но допускаемая амплитуда напряжений $[\sigma_a^*]$ должна приниматься с уменьшением в 1,65 раза *.

8.9. Если для какого-либо элемента трубопровода выполняются условия прочности п. 6.4 при оценке по сумме амплитуды приведенного напряжения $(\sigma_a)_2$, определенной на этапе III полного расчета, и максимальной абсолютной величины температурного напряжения в цикле каждого вида, то уточненный расчет амплитуды $(\sigma_a)_2$ с учетом нестационарных температурных напряжений и оценка усталостной прочности по ней для этого трубопроводного элемента не требуется.

9. НЕКОТОРЫЕ СПЕЦИАЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ

9.1. Трубопроводы АЭС, сооружаемых в сейсмических районах, должны быть дополнительно рассчитаны с учетом воздействия сейсмических нагрузок. Расчет производится на статическое нагружение при совместном воздействии внутреннего давления, весовой нагрузки и сейсмических сил. При этом промежуточные упругие

* Коэффициент запаса 1,65 вводится для компенсации возможной погрешности определения напряжений.

опоры учитываются при введении в расчет как их жесткостей, так и усилий воздействия их на трубопровод в рабочем состоянии.

Сейсмические силы, действующие на трубопровод, являются инерционными силами; они соответствуют формам свободных колебаний трубопровода и определяются по результатам расчета его на колебания.

Расчет производится при наиболее неблагоприятном распределении сейсмических сил (вызывающем наибольшие напряжения и нагрузки на оборудование). Расчет выполняется аналогично расчету по этапу I (см. раздел 2), но с учетом отмеченных условий нагружения трубопровода. Принимается условие прочности $(\sigma)_3 \leqslant 1{,}5[\sigma_н]$.

9.2. Требуется выполнение расчета трубопровода для условий гидроиспытания. Расчет выполняется на совместное действие внутреннего давления и весовой нагрузки; учитываются промежуточные штатные и дополнительные (если применяются) опоры. Промежуточные упругие опоры (не застопоренные) учитываются при введении в расчет их жесткостей и усилий воздействия на трубопровод в момент начала заполнения водой.

Расчет выполняется аналогично расчету по этапу I, но с учетом отмеченных условий нагужения. Принимается условие прочности $(\sigma)_3 \leqslant 1{,}5\,[\sigma_н]$, где допускаемое напряжение $[\sigma_н]$ соответствует температуре металла при гидроиспытании.

9.3. По решению проектной организации или по требованию АЭС может возникнуть необходимость проведения расчета трубопровода для условий нарушения нормального (расчетного) режима эксплуатации или для условий аварийной ситуации [2], например при поперечном разрыве трубопровода. В этом случае может потребоваться выполнение расчета трубопровода с учетом реакции вытекающей струи и реактивных усилий со стороны промежуточных опор, в том числе и специальных аварийных опор, включающихся в работу после наступления аварии.

Указанные расчеты выполняются аналогично расчету по этапу I, но с учетом конкретных особенностей нагружения. Условие прочности: $(\sigma)_3 \leqslant 1{,}5[\sigma_н]$.

10. ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММ РАСЧЕТА ТРУБОПРОВОДОВ, СОСТАВЛЕННЫХ В СООТВЕТСТВИИ С РТМ 24.038.08—72

10.1. До введения настоящего РТМ допускается выполнение полного расчета трубопроводов АЭС с применением программ, составленных в соответствии с РТМ 24.038.08—72 [5]. При этом в расчет должны вводиться коррективы, указанные в табл. 4.

10.2. При выполнении расчетов трубопроводов АЭС с применением РТМ 24.038.08—72 оценка прочности криволинейных труб с учетом начальной эллиптичности сечения и тройниковых узлов с учетом концентрации напряжений около кромки отверстия является обязательной.

Таблица 4

Коррективы РТМ 24.038.08—72, необходимые при применении его к расчету трубопроводов АЭС

Этап расчета по настоящему РТМ	Соответствующий этап расчета по РТМ 24.038.08—72	Коррективы
I	I	Принимается: $\varphi_и = 1$; критерий прочности $\sigma_{эф} \leqslant 1{,}3\,[\sigma_н]$
II	II	Без изменений
IIIа	II для высокотемпературных трубопроводов*	Принимается: $\chi = 1{,}0$; $m = \dfrac{1{,}5}{0{,}5\alpha_\sigma - 1}$; $a = 0$; $\varphi_и = 1$; $\sigma_{экв} \leqslant 2{,}5\,[\sigma_н]$
III	III	Величина эллиптичности поперечного сечения криволинейных труб принимается с увеличением в 2,5 раза; $\varphi_и = 1$ Допускаемая амплитуда напряжений принимается по черт. 19 РТМ 24.038.08—72 с уменьшением на 35%
IV	IV	Без изменений

* Оценку прочности прямолинейных труб по этапу IIIа следует производить по напряжениям, определяемым в этапе III.

10.3. Значения допускаемых напряжений $[\sigma_н]$, коэффициента прочности сварного стыка φ, модуля упругости, коэффициента линейного расширения следует принимать по Нормам [2]. Коэффициент перегрузки $k_п$ принимается по п. 5.5.2 настоящего РТМ.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

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. Положительные особенности его — 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 или направляющие опоры можно учитывать по способу замены их упругими опорами (упругими связями) очень большой жесткости.

1.4. Излагаемый алгоритм реализован в программе полного расчета трубопроводных систем, составленной на языке ФОРТРАН-IV.

2. ТЕРМИНЫ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

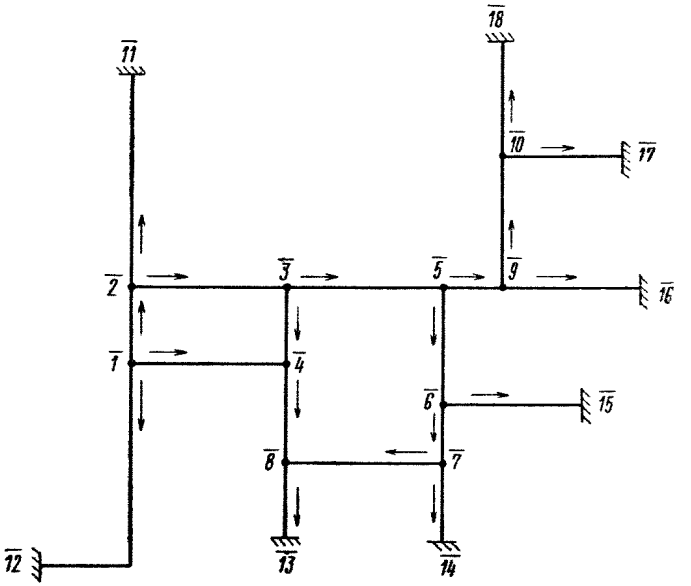
2.1. Под трубопроводной системой понимается разветвленный трубопровод, концы которого защемлены (черт. 1).

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.

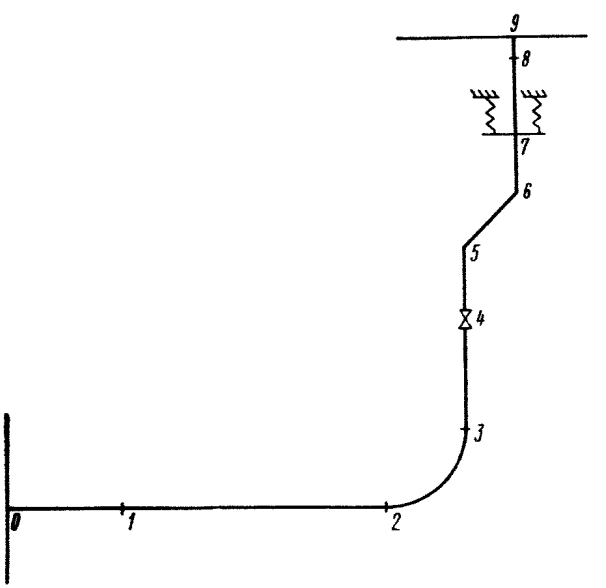
2.4. Каждый участок состоит из отрезков (прямолинейных, криволинейных). Границами отрезков являются: точка сопряжения прямолинейной трубы с криволинейной; место приложения внешней сосредоточенной нагрузки; место установки про-

Трубопроводная система



Черт. 1

Деление участка на отрезки

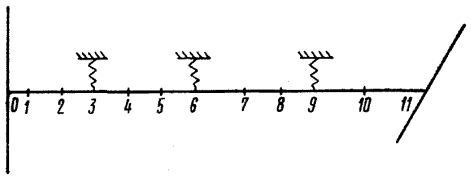


Черт. 2

межуточной опоры; место сопряжения труб, имеющих различные размеры поперечного сечения; сечение, где требуется определить напряжения или перемещения (черт. 2).

2.5. Пролет — часть участка, состоящая из нескольких отрезков (не менее двух) и заключенная между двумя смежными промежуточными опорами или узлом и ближайшей промежуточной опорой. Так, части *0-3*, *3-6*, *6-9*, *9-11* — пролеты участка, показанного на черт. 3.

Деление участка на пролеты



Черт. 3

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

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

2.8. Участок обозначается двумя числами с чертой наверху, отмечающими его концы. Так, участки трубопроводной системы (см. черт. 1) 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 стрелками).

3. КООРДИНАТНЫЕ СИСТЕМЫ

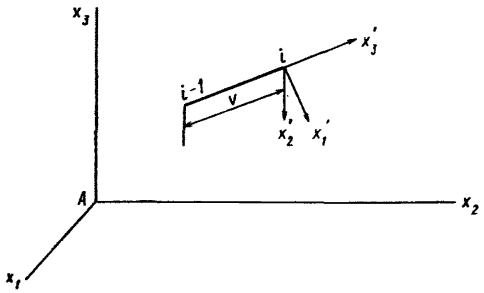
3.1. Используются правосторонние общая и местная ортогональные координатные системы. В общей координатной системе ($x_1x_2x_3$) определяются координаты точек деления участков на отрезки. Местная система координат ($ix_1'x_2'x_3'$) используется при учете монтажной растяжки и при определении положения бокового отверстия в трубе.

3.2. Начало общей координатной системы можно располагать 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) 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 направление ее выбирается в такую сторону, чтобы косинус угла между этой осью и осью x_1

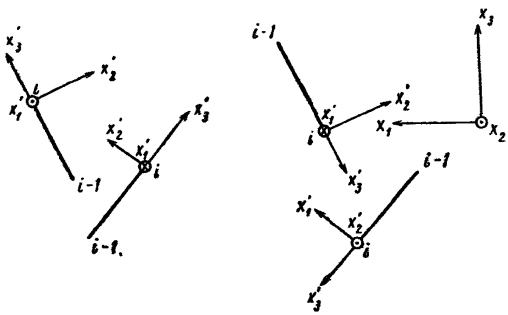
Общий случай расположения отрезка



Черт. 4

общей системы был положительным. Размещение местной координатной системы в частном случае расположения прямолинейного отрезка показано на черт. 5.

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



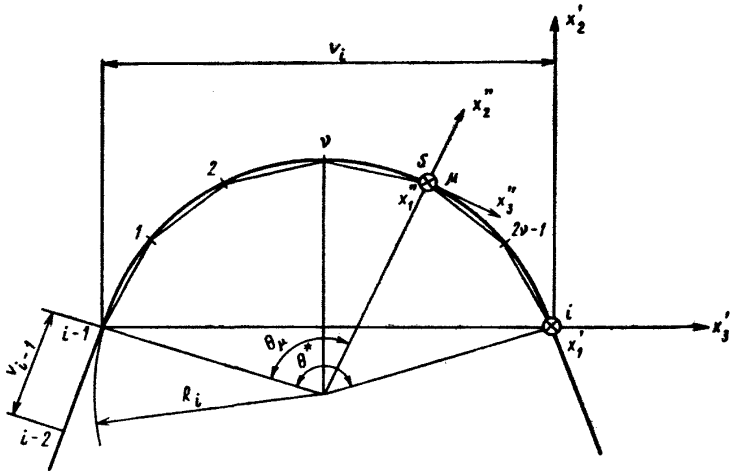
Черт. 5

Расположение местной координатной системы криволинейного отрезка показано на черт. 6. 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 по перпендикуляру 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 (черт. 6) ось x_3'' направлена по касательной в сторону от сечения $i-1$ к сечению i; ось x_2'' — по радиусу в сторону выпуклости отрезка.

Криволинейный отрезок



Черт. 6

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 точек (сечений) каждого участка задаются:

а) для каждой точки 0, 1, 2, ... деления на отрезки:

x_1, см
x_2, см
x_3, см
} координаты в общей координатной системе $x_1x_2x_3$ центра поперечного сечения;

б) для каждой точки в конце криволинейного отрезка:
R, см — радиус кривизны центральной оси;

в) для некоторых промежуточных точек:

e_{11}, кгс/см
e_{22}, кгс/см
e_{33}, кгс/см
} жесткости опоры скольжения или направляющей опоры по осям x_1, x_2, x_3;

P_1, кгс
P_2, кгс
P_3, кгс
} проекции вектора сосредоточенной силы на оси x_1, x_2, x_3;

$P_{зу}$, кгс — нагрузка пружинной подвески;
k, кгс/см — жесткость пружинной подвески;
L, см — рабочая длина пружинной подвески;

г) для одной точки (не совпадающей с концом пролета):

δ'_1, см
δ'_2, см
δ'_3, см
} проекции вектора поступательного перемещения начального сечения $(i+1)$-го отрезка относительно конечного сечения i-го отрезка, возникающего при выполнении монтажной растяжки в сечении i, на оси местной системы координат $ix_1x_2x_3$;

4.2. Для каждого участка в целом задаются:

p, кгс/см^2 — внутреннее избыточное давление;
β, 1/°С — коэффициент линейного расширения;

q_1, кгс/см
q_2, кгс/см
q_3, кгс/см
} интенсивность распределенной нагрузки по осям x_1, x_2, x_3;

$t_н$, °С — температура нагрева;
$D_н$, см — наружный диаметр;
$S_н$, см — толщина стенки;
c^*, см — утонение стенки;
E, кгс/см^2 — модуль упругости;

u_1, см
u_2, см
u_3, см
} проекции вектора поступательного перемещения защемленного конца.

Для некоторых отрезков значения $D_н$, $S_н$, c^* могут отличаться от их значений для всего участка.

5. РАСЧЕТ ОТРЕЗКОВ

5.1. Матрица поворота для прямолинейного отрезка

5.1.1. Исходные данные: координаты в системе $x_1x_2x_3$ концов $i-1$, i отрезка (см. черт. 4).

5.1.2. Матрица поворота

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

где

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

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

Здесь в обозначениях углов, а далее 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

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

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

В формуле для $\sin\hat{x}_3$ берется знак плюс, если r_1 и r_2 имеют разные знаки, и знак минус — в противном случае.

В случае $r_1=r_2=0$ принимается $\cos\hat{x}_3=1$, $\sin\hat{x}_3=0$, а в случае $r_1\neq 0$, $r_2=0$ 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 отрезка

5.2.1. Исходные данные: координаты в координатной системе $x_1x_2x_3$ концов $i-1$, i криволинейного отрезка и конца $i-2$ предшествующего прямолинейного отрезка; радиус кривизны R_i (см. черт. 6).

5.2.2. Искомая матрица поворота

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

Матрицы α_1, α_{2i} определяются для отрезка $(i-1)-i$ по формулам прямолинейного отрезка (2), (3), а

$$\alpha_{3i}=\begin{Vmatrix} \cos\hat{\eta}_{i3} & \sin\hat{\eta}_{i3} & 0 \\ -\sin\hat{\eta}_{i3} & \cos\hat{\eta}_{i3} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{Vmatrix}.$$

Здесь

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

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

где

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

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

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

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

5.3. Определение координат точек излома вписанной ломаной, заменяющей криволинейный отрезок

5.3.1. Исходные данные: координаты в координатной системе $x_1x_2x_3$ концов $i-2$, $i-1$, i отрезков; радиус кривизны R_i (см. черт. 6).

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

5.4. Матрица податливости для конечной точки отрезка

5.4.1. Исходные данные: координаты в координатной системе $x_1x_2x_3$ концов отрезка (в случае криволинейного отрезка — коор-

динаты концов отрезка вписанной ломаной); модуль упругости E; наружный диаметр трубы $D_н$; толщина стенки трубы $S_н$.

5.4.2. Искомая матрица

$$a_l = \tilde{D}_i a_i' D_i.$$

Здесь $\tilde{D}_i$ — матрица, являющаяся транспонированной по отношению к матрице D_i;

D_i — матрица 6×6, равная

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

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

где 0_3 — нулевая матрица 3×3;

α_i — матрица поворота, вычисляемая по формуле (1);

$$F_1' = Av;$$

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

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

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

$$F_5' = Bv.$$

Здесь

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

$$A = \begin{Vmatrix} \frac{2}{GF} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2}{GF} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{EF} \end{Vmatrix}; \qquad B = \begin{Vmatrix} \frac{k_р^*}{EJ_э} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_р^*}{EJ_э} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{GJ_р} \end{Vmatrix}, \tag{7}$$

где

$$\left.\begin{aligned} F &= \pi S_н (D_н - S_н); \\ J_э &= \frac{\pi D_н^4}{64}\left[1 - \left(\frac{D_н - 2S_н}{D_н}\right)^4\right]; \\ J_р &= 2J_э; \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

$$G = \frac{E}{2{,}6}.$$

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

Длина отрезка v вычисляется по формуле (4).

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

5.5. Матрица перемещений начального сечения отрезка вследствие распределенных воздействий и монтажной растяжки

5.5.1. Исходные данные: координаты в системе $x_1x_2x_3$ концов отрезка i (в случае криволинейного отрезка — координаты концов отрезка вписанной ломаной); температура нагрева $t_н$; значения перемещений данного сечения i при монтажной растяжке; значение интенсивности распределенной нагрузки для отрезка; коэффициент линейного расширения β; значения E, G, $D_н$, $S_н$ для отрезка i.

Примечание. В случае криволинейного отрезка расчет ведется для заменяющих прямолинейных отрезков, причем все исходные значения, кроме координат, соответствуют криволинейному отрезку в целом.

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

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

Здесь

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

где

q — интенсивность распределенной нагрузки;

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

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

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

Значения w_1, w_2, A, F, $J_э$ определяются по формулам (6), (7), (8).

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

Матрица q имеет вид:

$q = \{\times\times\times 000\}$ ($\times$ — элементы, значения которых задаются).

Матрицы Δ'_{it} и δ'_i имеют значения:

$$\Delta'_{it} = \beta t_н v \{001000\};$$
$$\delta_i' = \{\times\times\times 000\}.$$

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

5.6.1. Исходные данные: координаты в системе $x_1x_2x_3$ концов отрезка (для криволинейного отрезка — координаты концов отрезка вписанной ломаной); значение интенсивности распределенной нагрузки.

5.6.2. Искомая матрица (для конечной точки отрезка)

$$V_i = v\tilde{D}_i \left\| \begin{matrix} I_3 & 0_3 \\ (1/2)vw_2 & I_3 \end{matrix} \right\| D_i q.$$

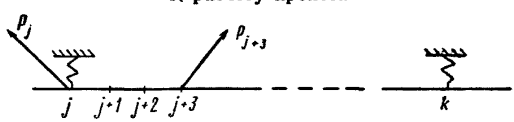
Значения величин v, D_i, q, w_2 приводились выше; I_3 — единичная матрица 3×3.

6. РАСЧЕТ ПРОЛЕТА

6.1. Определение некоторых матриц пролета

6.1.1. Определяются следующие матрицы (черт. 7):

К расчету пролета



Черт. 7

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

при $p = j+1,\ j+2,\ \ldots,\ k$.

Последнюю формулу при программировании целесообразно представить в виде

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

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 проекции радиуса-вектора $\vec{r}_{jp}$ на оси координатной системы $x_1x_2x_3$;

P_{ν} ($\nu=j+1, j+2, \ldots, k-1$) — матрица-столбец внешней сосредоточенной нагрузки (первые три элемента задаются, а последние три равны нулю).

Матрицы a_{ν}, V_{ν}, Δ_{ν} вычисляются по приведенным в разделе 5 формулам.

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).

6.2. Вектор сил в начальном сечении пролета

6.2.1. Исходные данные: j, k — номера сечений концов пролета; λ_j, λ_k — векторы (6×1) перемещений концов пролета (определение их см. в п. 9).

6.2.2. 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.

6.3. Векторы перемещений и сил в промежуточных сечениях пролета

6.3.1. Исходные данные: λ_j — вектор перемещений начального сечения пролета; X_j — вектор сил в начальном сечении пролета.

6.3.2. Искомые векторы

$$\left.\begin{aligned} \lambda_i &= \widetilde{G}_{i\,(i-1)}\lambda_{i-1} - a_i\left(G_{(i-1)\,i}X_{i-1} + V_i\right) + \Delta_i; \\ X_i &= G_{(i-1)\,i}X_{i-1} + P_i + V_i \end{aligned}\right\} \qquad (11)$$

при $i = j+1, \ldots, k-1$.

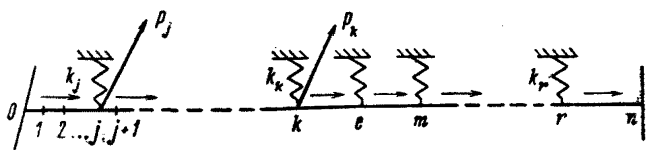
Примечание. Для последнего пролета участка (т. е. при $k=n$) по формулам (11) вычисляются, кроме того, значения матриц λ_n, X_n. По λ_n производится контроль правильности вычислений: в случае защемленного конца перемещения λ_n должны быть равны заданным перемещениям, в противном случае — вычисленным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

7. РАСЧЕТ УЧАСТКА

7.1. Расчет начинается с замены криволинейных элементов вписанными ломаными, т. е. с определения координат точек излома последних (см. подраздел 5.3). Кроме того, для криволинейных элементов должны быть вычислены значения коэффициента k_p^*.

Последовательно вычисляются для сечений, где установлены промежуточные опоры (черт. 8), матрицы

К расчету участка



Черт. 8

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

причем

$L_0 = 0_6$ (нулевая матрица 6×6);
$N_0 = I_6$ (единичная матрица 6×6);
$M_0 = \overline{0}_6$ (нулевой вектор 6×1);

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

где l — номер конца пролета;
k — номер начала пролета;
m — конец следующего пролета;
e_l — матрица 6×6, в которой ненулевыми являются только первые три диагональных элемента e^l_{11}, e^l_{22}, e^l_{33}:

$$e_l = \begin{Vmatrix} e^l_{11} & & & & & \\ & e^l_{22} & & & & 0 \\ & & e^l_{33} & & & \\ & & & 0 & & \\ 0 & & & & 0 & \\ & & & & & 0 \end{Vmatrix}.$$

Для упругой опоры

$$e^l_{11} = e^l_{22} = \frac{P^{(l)}_{3y}}{L_l}; \quad e^l_{33} = k_l,$$

где k_l, L_l — жесткость и рабочая длина промежуточной пружинной подвески;
$P^{(l)}_{3y}$ — рабочая нагрузка пружинной подвески.

Для опоры скольжения или направляющей опоры e^l_{11}, e^l_{22}, e^l_{33} принимаются по исходным данным.

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

Примечание. Матрицы L_l, N_l, M_l желательно запоминать для проведения расчета напряжений.

Кроме того, вычисляются матрицы:

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

где j — конец первого пролета;
r — начало последнего пролета;
n — конец участка.

Далее вычисляются матрицы:

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

Для промежуточных участков, кроме того, вычисляются матрицы:

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

В случае когда участок не имеет промежуточных опор, в формулах (16) следует принять

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

а в формулах (15)

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

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

Примечание. Принимается предположение, что в узлах промежуточные опоры отсутствуют.

8. ФОРМИРОВАНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ

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

$$\left\| \begin{matrix} A^{\Sigma}_{\overline{1}\overline{1}} & A_{\overline{1}\overline{2}} & A_{\overline{1}\overline{3}} \ldots A_{\overline{1}\overline{N}} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ A_{\overline{i}\overline{1}} & A_{\overline{i}\overline{2}} & A_{\overline{i}\overline{3}} \ldots A_{\overline{i}\overline{N}} \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ A_{\overline{N}\overline{1}} & A_{\overline{N}\overline{2}} & A_{\overline{N}\overline{3}} \ldots A^{\Sigma}_{\overline{N}\overline{N}} \end{matrix} \right\| \times \left\| \begin{matrix} \lambda_{\overline{1}} \\ \cdots \\ \lambda_{\overline{i}} \\ \cdots \\ \lambda_{\overline{N}} \end{matrix} \right\| = \left\| \begin{matrix} B^{\Sigma}_{\overline{1}} \\ \cdots \\ B^{\Sigma}_{\overline{i}} \\ \cdots \\ B^{\Sigma}_{\overline{N}} \end{matrix} \right\|. \qquad (17)$$

Целесообразно формирование системы (17) производить одновременно с расчетом участков, не выделяя в отдельный блок.

Коэффициенты $A^{\Sigma}_{\overline{1}\overline{1}}$, $A_{\overline{1}\overline{2}}$, . . . — матрицы 6×6;

$\lambda_{\overline{1}}$, $\lambda_{\overline{2}}$, . . ., $B^{\Sigma}_{\overline{1}}$, $B^{\Sigma}_{\overline{2}}$, . . . — векторы-столбцы 6×1.

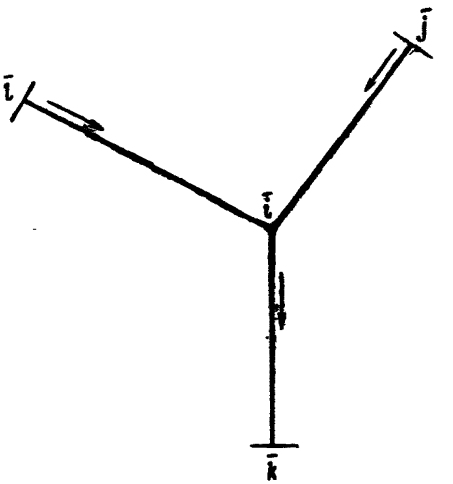
Каждая строка системы соответствует одному узлу, а именно узлу, номер которого составляет нижний индекс при λ и B^{Σ} и первый нижний индекс при A (второй индекс — номер узла, с которым данный узел соединен участком).

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

8.2. Матрица $A^{\Sigma}_{\overline{i}\overline{i}}$ является суммой матриц A_{00}, A_{nn} участков, сходящихся в данном узле $\overline{i}$, 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,

К формированию системы матричных уравнений



Черт. 9

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

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

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

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

Так, для узла $\bar{i}$ (черт. 9)

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

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

8.3. Матрица $B^{\Sigma}_{\bar{i}}$ 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 B_{0n}, а для таких участков, нумерация точек деления которых заканчивается в узле, берется B_{n0}. В случае когда к узлу подходит концевой участок, в сумму $B^{\Sigma}_{\bar{i}}$ включается также матрица $A_{0n}\lambda_n$ этого участка. Например, для узла, представленного на черт. 9, если участок $\bar{i} — \bar{k}$ концевой,

$$B^{\Sigma}_{\bar{i}} = -\left(B^{\bar{i}\bar{k}}_{0n} + B^{\bar{j}\bar{i}}_{n0} + B^{\bar{i}\bar{i}}_{n0} + A^{\bar{i}\bar{k}}_{0n}\lambda^{\bar{i}\bar{k}}_{n}\right).$$

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

$$\lambda_{\bar{1}} = \left(A^{\Sigma}_{\bar{1}\bar{1}}\right)^{-1} B^{\Sigma}_{\bar{1}}.$$

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. концевых сечений пролета), вычисляются по формуле обратного хода (см. черт. 8)

$$\lambda_l = L_l \lambda_m + N_l \lambda_0 + M_l.$$

Усилия в начальных сечениях пролетов вычисляются по формуле (10). Для участков, не имеющих 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 на эти оси вектора углового перемещения.

Для сечений 0, 1, 2, ..., n участков, а также для сечений, расположенных по середине криволинейных отрезков, вычисляются напряжения. Предварительно матрица сил X_i, действующих в этих сечениях, должна быть приведена к осям подвижной координатной системы по 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 формула — для сечения, расположенного в конце криволинейного отрезка.

Матрица D_i вычисляется в соответствии с п. 5.4.2. 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

$$D_i^0 = \begin{Vmatrix} \alpha_i^0 & 0_3 \\ 0_3 & \alpha_i^0 \end{Vmatrix},$$

где

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

При определении напряжений в криволинейных трубах 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 (тройниковый узел, см. черт. 7 настоящего 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

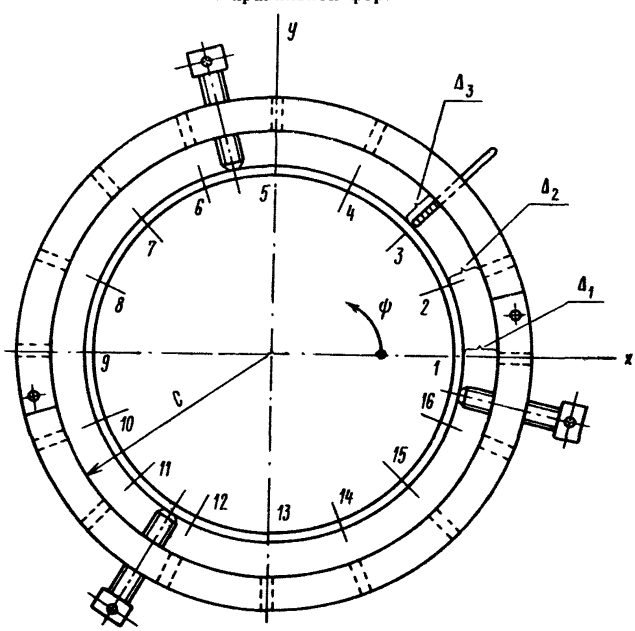
Рекомендуемое

МЕТОДИКА РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЙ В КРИВОЛИНЕЙНЫХ ТРУБАХ

1. Учитываются внутреннее давление, изгибающие и крутящий моменты и осевая сила. Поперечное сечение может иметь произвольное (малое) отступление от строго круговой формы. Толщина стенки предполагается постоянной.

Напряжения определяются для внутренней и наружной поверхности трубы дискретно вдоль контура поперечного сечения с угловым шагом 10°.

Определение стрелок отклонения Δ_i поперечного сечения трубы от правильной формы



2. Исходными данными для проведения расчета являются значения следующих величин:

$D_н$ — наружный диаметр трубы, см;

$S_и$ — номинальная толщина стенки трубы, см;

$S_ф$ — толщина стенки трубы с учетом возможного утонения ($S_ф = S_и - c$ *), см;

R — радиус оси трубы, см;

p — внутреннее давление, кгс/см^2;

M_x, M_y, M_z — изгибающие и крутящий моменты в сечении трубы, кгс · см (см. черт. 12 настоящего РТМ);

N_z — осевая растягивающая (сжимающая) сила *, кгс;

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

Δ_ν ($\nu = 1, 2, \ldots, 16$) — радиальные отклонения контура поперечного сечения от правильной окружности (чертеж) **, см;

C — радиус базовой окружности прибора, служащего для определения отклонений Δ_ν (см. чертеж), см.

3. Вычисление среднего радиуса a_0 и коэффициентов a'_n, b'_n ($n = 2, 3, \ldots, 10$):

$$C_1 = \Delta_3 + \Delta_{11} - \Delta_7 - \Delta_{15};$$

$$C_2 = 0{,}707\,(\Delta_2 + \Delta_4 + \Delta_{10} + \Delta_{12} - \Delta_6 - \Delta_8 - \Delta_{14} - \Delta_{16});$$

$$C_3 = \Delta_{12} + \Delta_{14} - \Delta_4 - \Delta_6;$$

$$C_4 = 0{,}707\,(\Delta_3 + \Delta_7 - \Delta_{11} - \Delta_{15});$$

$$C_5 = \Delta_2 + \Delta_8 - \Delta_{10} - \Delta_{16};$$

$$C_6 = \Delta_{13} - \Delta_5;$$

$$C_7 = 0{,}707\,(\Delta_2 + \Delta_8 + \Delta_0 + \Delta_{16} - \Delta_4 - \Delta_6 - \Delta_{12} - \Delta_{14});$$

$$C_8 = \Delta_1 + \Delta_9 - \Delta_5 - \Delta_{13};$$

$$C_9 = \Delta_2 + \Delta_{16} - \Delta_8 - \Delta_{10};$$

$$C_{10} = 0{,}707\,(\Delta_7 + \Delta_{11} - \Delta_3 - \Delta_{15});$$

$$C_{11} = \Delta_6 + \Delta_{12} - \Delta_4 - \Delta_{14};$$

$$C_{12} = \Delta_1 - \Delta_9;$$

$$C_{13} = \Delta_1 + \Delta_5 + \Delta_9 + \Delta_{13};$$

$$C_{14} = \Delta_3 + \Delta_7 + \Delta_{11} + \Delta_{15};$$

$$C_{15} = \Delta_2 + \Delta_6 + \Delta_{10} + \Delta_{14};$$

$$C_{16} = \Delta_4 + \Delta_8 + \Delta_{12} + \Delta_{16};$$

---

* См. п. 9 приложения 1. Для учета возможной погрешности определения внутренних силовых факторов расчет производится в двух вариантах: с увеличением расчетных значений M_x, M_y, M_z, N_z в $k_п$ раз; с уменьшением их в $k_п$ раз, где $k_п$ — коэффициент перегрузки (см. п. 5.5.2 РТМ).

** Для трубы со строго эллиптической формой отступления сечения вместо Δ_ν задается величина эллиптичности a, %.

$$a_0 = \left[C - \frac{S_н}{2} - \frac{1}{16}(C_{13} + C_{14} + C_{15} + C_{16})\right];$$

$$a_2' = C_7 + C_8;$$

$$a_3' = 0{,}383C_9 + C_{10} + 0{,}924C_{11} + C_{12};$$

$$a_4' = C_{13} - C_{14};$$

$$a_5' = -0{,}383C_9 + C_{10} - 0{,}924C_{11} + C_{12};$$

$$a_6' = -C_7 + C_8;$$

$$a_7' = -0{,}924C_9 - C_{10} + 0{,}383C_{11} + C_{12};$$

$$a_8' = C_{13} + C_{14} - C_{15} - C_{16};$$

$$a_9' = a_7';$$

$$a_{10}' = a_6';$$

$$b_2' = C_1 + C_2;$$

$$b_3' = 0{,}383C_3 + C_4 + 0{,}924C_5 + C_6;$$

$$b_4' = C_{15} - C_{16};$$

$$b_5' = 0{,}383C_3 - C_4 + 0{,}924C_5 - C_6;$$

$$b_6' = C_2 - C_1;$$

$$b_7' = 0{,}383C_5 - C_4 - 0{,}924C_3 + C_6;$$

$$b_8' = 0;$$

$$b_9' = -b_7';$$

$$b_{10}' = -b_6'.$$

В частном случае эллиптической формы отступления

$$a_2' = -\frac{a}{50} D_н, \quad b_2' = a_n' = b_n' = 0 \ (n = 3, 4, \ldots),$$

где a — начальная эллиптичность сечения, %.

4. Вычисление геометрических параметров трубы и параметров нагружения:

$$\beta = \frac{D_н}{D_н - 2S_н}; \quad \lambda = \frac{S_н R}{a_0^2}; \quad \zeta = \frac{pR}{S_н a_0}; \quad \omega = 1{,}82\frac{\zeta R}{E};$$

$$W = \frac{\pi D_н^3}{32}\left[1 - \frac{1}{\beta^4}\right];$$

$$\sigma^{0н}_{z(x)} = \frac{M_x}{W}; \quad \sigma^{0н}_{z(y)} = \frac{M_y}{W}; \quad \sigma^{0в}_{z(x)} = \frac{\sigma^{0н}_{z(x)}}{\beta}; \quad \sigma^{0в}_{z(y)} = \frac{\sigma^{0н}_{z(y)}}{\beta}.$$

Здесь и в дальнейшем верхние индексы *н* и *в* обозначают поверхность трубы («наружная», «внутренняя»).

5. Вычисление напряжений, вызываемых крутящим моментом, внутренним давлением и осевой силой:

$$\tau^{н} = \frac{M_z}{2W};$$

$$\tau^{в} = \frac{M_z}{2W}\frac{1}{\beta};$$

$$\sigma_{zp} = \frac{p}{\beta^2 - 1}\frac{S_н}{S_ф};$$

$$\sigma^{н}_{\varphi p} = 2\sigma_{zp} - \frac{\sigma_{zp} D_н \sin\psi}{2R + D_н \sin\psi};$$

$$\sigma^{в}_{\varphi p} = 2\sigma_{zp} + p - \frac{\sigma_{zp}(D_н - 2S_н)\sin\psi}{2R + (D_н - 2S_н)\sin\psi};$$

$$\sigma_{zN} = \frac{4N_z}{\pi (D_н + 2S_н)^2 (\beta^2 - 1)}.$$

6. Вычисление коэффициентов A_{i2} ($i = 2, 4, 6, 8, 10$), $k_р$:

$$\overline{A}_2 = 0{,}1250 + \frac{\lambda^2}{6}\cdot 3^2 + 3\omega;$$

$$A_4 = 1{,}0625 + \frac{\lambda^2}{6}\cdot 15^2 + 15\omega;$$

$$A_6 = 1{,}0278 + \frac{\lambda^2}{6}\cdot 35^2 + 35\omega;$$

$$A_8 = 1{,}0156 + \frac{\lambda^2}{6}\cdot 63^2 + 63\omega;$$

$$A_{10} = 1{,}0100 + \frac{\lambda^2}{6}\cdot 99^2 + 99\omega;$$

$$a_{55} = A_{10};$$

$$a_{44} = A_8 - \frac{0{,}2316}{a_{55}}; \quad a_{22} = A_4 - \frac{0{,}1914}{a_{33}};$$

$$a_{33} = A_6 - \frac{0{,}2197}{a_{44}}; \quad a_{11} = \overline{A}_2 - \frac{0{,}0977}{a_{22}};$$

$$A_{22} = -\frac{1}{a_{11}};$$

$$A_{42} = A_{24} = A_{22}\frac{0{,}3125}{a_{22}};$$

$$A_{62} = A_{26} = A_{42}\frac{0{,}4375}{a_{33}};$$

$$A_{82} = A_{28} = A_{62}\frac{0{,}4688}{a_{44}};$$

$$A_{10\cdot2} = A_{2\cdot10} = A_{82}\frac{0{,}4813}{a_{55}};$$

$$k_{\text{р}} = 1 - 1{,}125A_{22}.$$

7. Вычисление коэффициентов A^0_{in} (i, $n = 2, 4, 6, 8, 10$):

$$A_{44} = \frac{1}{a_{22}}(0{,}3125A_{42} - 1);$$

$$\alpha_1 = \frac{a_{11}}{0{,}3125} + \frac{0{,}3125}{a_{22}};$$

$$A_{64} = A_{46} = A_{62}\alpha_1;$$

$$A_{84} = A_{48} = A_{82}\alpha_1;$$

$$A_{10.4} = A_{4.10} = A_{10.2}\alpha_1;$$

$$A_{66} = \frac{1}{a_{33}}(0{,}4375A_{64} - 1);$$

$$A_{86} = A_{68} = \frac{1}{a_{33}}\left(0{,}4375A_{84} - \frac{0{,}4688}{a_{44}}\right);$$

$$A_{10.6} = A_{6.10} = \frac{1}{a_{33}}\left(0{,}4375A_{10.4} - \frac{0{,}2256}{a_{44}a_{55}}\right);$$

$$A_{88} = \frac{1}{a_{44}}(0{,}4687A_{86} - 1);$$

$$A_{10.8} = A_{8.10} = \frac{1}{a_{44}}\left(0{,}4688A_{10.6} - \frac{0{,}4813}{a_{55}}\right);$$

$$A_{10.10} = \frac{1}{a_{55}}(0{,}4813A_{10.8} - 1).$$

$$A^0_{i2} = -3A_{i2};$$

$$A^0_{i4} = -15A_{i4};$$

$$A^0_{i6} = -35A_{i6};$$

$$A^0_{i8} = -63A_{i8};$$

$$A^0_{i10} = -99A_{i10}$$

при $i = 2, 4, 6, 8, 10$.

8. Вычисление коэффициентов A^0_{jn} (j, $n = 3, 5, 7, 9$):

$$A_3 = 1{,}1111 + \frac{\lambda^2}{6}\cdot 8^2 + 8\omega;$$

$$A_5 = 1{,}0400 + \frac{\lambda^2}{6}\cdot 24^2 + 24\omega;$$

$$A_7 = 1{,}0204 + \frac{\lambda^2}{6}\cdot 48^2 + 48\omega;$$

$$A_9 = 1{,}0124 + \frac{\lambda^2}{6} \cdot 80^2 + 80\omega;$$

$$\bar{a}_{44} = A_9;$$

$$\bar{a}_{33} = A_7 - \frac{0{,}2268}{\bar{a}_{44}};$$

$$\bar{a}_{22} = A_5 - \frac{0{,}2090}{\bar{a}_{33}};$$

$$\bar{a}_{11} = A_3 - \frac{0{,}1600}{\bar{a}_{22}};$$

$$A_{33} = -\frac{1}{\bar{a}_{11}};$$

$$A_{35} = A_{53} = A_{33} \cdot \frac{0{,}4000}{\bar{a}_{22}};$$

$$A_{37} = A_{73} = A_{35} \cdot \frac{0{,}4571}{\bar{a}_{33}};$$

$$A_{39} = A_{93} = A_{37} \cdot \frac{0{,}4762}{\bar{a}_{44}};$$

$$A_{55} = \frac{1}{\bar{a}_{22}} (0{,}4A_{35} - 1);$$

$$\alpha_2 = \frac{\bar{a}_{11}}{0{,}4} + \frac{0{,}4}{\bar{a}_{22}};$$

$$A_{57} = A_{75} = A_{37}\alpha_2;$$

$$A_{59} = A_{95} = A_{39}\alpha_2;$$

$$A_{77} = \frac{1}{\bar{a}_{33}} (0{,}4571A_{57} - 1);$$

$$A_{79} = A_{97} \frac{1}{\bar{a}_{33}} \left(0{,}4571A_{59} - \frac{0{,}4762}{\bar{a}_{44}}\right);$$

$$A_{99} = \frac{1}{\bar{a}_{44}} (0{,}4762A_{79} - 1).$$

$$A^0_{j3} = -8A_{j3};$$

$$A^0_{j5} = -24A_{j5};$$

$$A^0_{j7} = -48_{j7};$$

$$A^0_{j9} = -80_{j9}$$

при $j = 3, 5, 7, 9$.

9. Вычисление мембранных напряжений от изгиба:

$$\bar{\sigma}_{\psi} = \left(\sigma^{0н}_{z\,(x)}\gamma_3 + \sigma^{0н}_{z\,(y)}\gamma_5\right)\frac{a_0}{R}\,\frac{\beta+1}{2\beta},$$

где

$$\gamma_3 = \cos\psi\left(-k_p\cos\psi + \frac{3}{2}\sum_{i=2,4\ldots}^{10} A_{i2}\Phi^0_{1i}\right);$$

$$\gamma_5 = k_p\sin\psi\cos\psi\left(1 - \frac{3+2\sin^2\psi}{5+6\lambda^2+12\omega}\right),$$

причем

$$\Phi^0_{1i} = \frac{1}{2i}\left[\frac{1+i}{1-i}\cos(1-i)\psi - \frac{1-i}{1+i}\cos(1+i)\psi\right].$$

Здесь и в дальнейшем расчет производится для следующей последовательности значений угла ψ:

$$\psi_n = nh_{\psi}, \quad n = 0,\ 1,\ 2,\ \ldots,\ 35,$$

где шаг изменения угла $h_{\psi} = 2\pi/36$.

10. Вычисление напряжений из-за неправильности формы поперечного сечения:

$$\sigma_{zн} = -\zeta\beta_3;$$

$$\sigma_{\varphi н} = -\zeta\gamma_6,$$

где

$$\beta_{3j} = -\frac{1}{4}\left[\frac{3}{4}\sum_{n=2,4,\ldots}^{10} A^0_{2n}\left(a'_n\sin\psi - b'_n\cos\psi\right) + \right.$$

$$+\sum_{i=2,4,\ldots}^{10}\sum_{n=2,4,\ldots}^{10} A^0_{in}\left(a'_n\Phi_{1i} + b'_n\Phi_{2i}\right) +$$

$$\left.+\sum_{j=3,5,\ldots}^{9}\sum_{n=3,5}^{9} A^0_{jn}\left(a'_n\Phi_{1j} + b'_n\Phi_{2j}\right)\right];$$

$$\gamma_6 = -0{,}075\left[\frac{3}{4}\sum_{n=2,4,\ldots}^{10} A^0_{2n}\left(a'_n\sin\psi - b'_n\cos\psi\right) + \right.$$

$$+\sum_{i=2,4,\ldots}^{10}\sum_{n=2,4,\ldots}^{10} A^0_{in}\left(a'_n\Phi_{3i} + b'_n\Phi_{4i}\right) +$$

$$\left.+\sum_{j=3,5,\ldots}^{9}\sum_{n=3,5}^{9} A^0_{jn}\left(a'_n\Phi_{3j} + b'_n\Phi_{4j}\right)\right],$$

причем (заменяя для краткости i и j одной буквой ν):

$$\Phi_{1\nu} = \sin\psi\cos\nu\psi - \frac{1}{\nu}\cos\psi\sin\nu\psi \pm 0{,}15\lambda(1-\nu^2)\cos\nu\psi;$$

$$\Phi_{2\nu} = \sin\psi\sin\nu\psi + \frac{1}{\nu}\cos\psi\cos\nu\psi \pm 0{,}15\lambda(1-\nu^2)\sin\nu\psi;$$

$$\Phi_{3\nu} = \sin\psi\cos\nu\psi - \frac{1}{\nu}\cos\psi\sin\nu\psi \pm \frac{\lambda}{0{,}6}(1-\nu^2)\cos\nu\psi;$$

$$\Phi_{4\nu} = \sin\psi\sin\nu\psi + \frac{1}{\nu}\cos\psi\cos\nu\psi \pm \frac{\lambda}{0{,}6}(1-\nu^2)\sin\nu\psi,$$

где верхний знак соответствует внутренней поверхности, а нижний — наружной.

11. Вычисление изгибных напряжений, вызванных моментами M_x, M_y:

$$\sigma^{\text{н}}_{zM} = \sigma^{0\text{н}}_{z(x)}\beta^{\text{н}}_1 + \sigma^{0\text{н}}_{z(y)}\beta^{\text{н}}_2;$$

$$\sigma^{\text{в}}_{zM} = \sigma^{0\text{в}}_{z(x)}\beta^{\text{в}}_1 + \sigma^{0\text{в}}_{z(y)}\beta^{\text{в}}_2;$$

$$\sigma^{\text{н}}_{\psi M} = \left(\sigma^{0\text{н}}_{z(x)}\gamma^{\text{н}}_1 + \sigma^{0\text{н}}_{z(y)}\gamma^{\text{н}}_2\right)\frac{\beta+1}{2\beta};$$

$$\sigma^{\text{в}}_{\psi M} = \left(\sigma^{0\text{н}}_{z(x)}\gamma^{\text{в}}_1 + \sigma^{0\text{н}}_{z(y)}\gamma^{\text{в}}_2\right)\frac{\beta+1}{2\beta},$$

где

$$\beta^{\text{н}}_1 = k_{\text{р}}\sin\psi - \frac{3}{2}\sum_{i=2,4,\ldots}^{10} A_{i2}\Phi^{\text{н}}_{1i};$$

$$\beta^{\text{в}}_1 = k_{\text{р}}\sin\psi - \frac{3}{2}\sum_{i=2,4,\ldots}^{10} A_{i2}\Phi^{\text{в}}_{1i};$$

$$\beta^{\text{н}}_2 = k_{\text{р}}\cos\psi + \frac{3}{2}\sum_{i=2,4,\ldots}^{10} A_{i2}\Phi^{\text{н}}_{2i};$$

$$\beta^{\text{в}}_2 = k_{\text{р}}\cos\psi + \frac{3}{2}\sum_{i=2,4,\ldots}^{10} A_{i2}\Phi^{\text{в}}_{2i};$$

$$\gamma^{\text{н}}_1 = 0{,}3k_{\text{р}}\sin\psi - 0{,}45\sum_{i=2,4,\ldots}^{10} A_{i2}\Phi^{\text{н}}_{3i};$$

$$\gamma^{\text{в}}_1 = 0{,}3k_{\text{р}}\sin\psi - 0{,}45\sum_{i=2,4,\ldots}^{10} A_{i2}\Phi^{\text{в}}_{3i};$$

$$\gamma^{\text{н}}_2 = 0{,}3k_{\text{р}}\cos\psi + 0{,}45\sum_{i=2,4,\ldots}^{10} A_{i2}\Phi^{\text{н}}_{4i};$$

$$\gamma_2^{\text{в}} = 0{,}3k_{\text{р}} \cos \psi + 0{,}45 \sum_{i=2,\,4,\,\ldots}^{10} A_{i2} \Phi_{4i}^{\text{в}}.$$

12. Вычисление нормальных напряжений на взаимноперпендикулярных площадках:

$$\sigma_z^{\text{н}} = \sigma_{zM}^{\text{н}} + \sigma_{zN} + \sigma_{z\text{н}}^{\text{н}} + \sigma_{zp};$$

$$\sigma_z^{\text{в}} = \sigma_{zM}^{\text{в}} + \sigma_{zN} + \sigma_{z\text{н}}^{\text{в}} + \sigma_{zp};$$

$$\sigma_\psi^{\text{н}} = \sigma_{\psi M}^{\text{н}} + \sigma_{\psi\text{н}}^{\text{н}} + \bar{\sigma}_\psi + \sigma_{\psi p}^{\text{н}};$$

$$\sigma_\psi^{\text{в}} = \sigma_{\psi M}^{\text{в}} + \sigma_{\psi\text{н}}^{\text{в}} + \bar{\sigma}_\psi + \sigma_{\psi p}^{\text{в}}.$$

Радиальное нормальное напряжение для внутренней поверхности

$$\sigma_r^{\text{в}} = -p,$$

а для наружной поверхности

$$\sigma_r^{\text{н}} = 0.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Справочное

ЛИТЕРАТУРА

1. Выбор упругих опор для трубопроводов тепловых и атомных электростанций. РТМ 24.038.12—72.

2. Нормы расчета на прочность элементов реакторов, парогенераторов, сосудов и трубопроводов атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок. М., «Металлургия», 1973.

3. Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок. М., «Металлургия», 1973.

4. Расчет прочности трубопроводов энергоустановок для условий нестационарных температурных режимов. РТМ 24.038.11—72.

5. Расчет трубопроводов энергетических установок на прочность. РТМ 24.038.08—72.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
1. Общие положения	2
2. Этапы полного расчета	4
3. Определение усилий воздействия на оборудование	8
4. Определение коэффициента податливости криволинейных труб и секторных колен	8
5. Определение напряжений на этапах полного расчета	15
6. Критерии прочности для этапов полного расчета	29
7. Применение и учет монтажной растяжки	30
8. Расчет с учетом нестационарных температурных режимов	31
9. Некоторые специальные расчеты	33
10. Применение программ расчета трубопроводов, составленных в соответствии с РТМ 24.038.08—72	34
Приложение 1. Алгоритм расчета трубопроводных систем	36
Приложение 2. Методика расчета напряжений в криволинейных трубах	54
Приложение 3. Литература	63

Ответственный за выпуск *В. С. Розанова.*

Редактор *Г. Д. Семёнова.*

Техн. ред. *Н. П. Белянина.* Корректоры: *Л. А. Крупнова* и *С. М. Косенкова.*

Сдано в набор 10.06.76. Подп. к печ. 16.09.76. Формат бум. 60×90¹/₁₆.
Объем 4 печ. л. +1 вкл. (4,125 усл. печ. л.). Тираж 1000 экз. Заказ 573.
Цена 83 коп.

Редакционно-издательский отдел ЦКТИ им. И. И. Ползунова
194021, Ленинград, Политехническая ул., д. 24.

ОПЕЧАТКА

Прежде чем пользоваться РТМ 108.020.01—75, внесите исправления.

В каком месте	Напечатано	Должно быть
Стр. 8, строки 7 и 8 сверху	3.2. Если в трубопроводе не применяется монтажная растяжка, то усилия воздействия . . .	3.2. Если в трубопроводе не применяется монтажная растяжка и отсутствуют упругие опоры, то усилия воздействия . . .

РТМ 108.020.01—75. Расчет трубопроводов АЭС на прочность.

Заказ 573. Тираж 1000 экз.

gost.e-ecolog.ru