КУЙБЫШЕВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
ТРУДЫ, ВЫПУСК XIX. 1965 г.
Вибрационная прочность и надежность авиационных двигателей

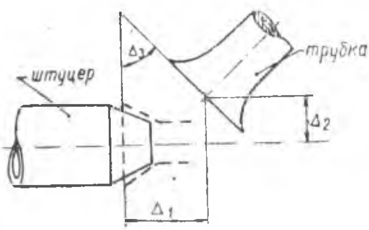
С. И. ИВАНОВ, С. М. ЛЕЖИН

МОНТАЖНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ТРУБОПРОВОДАХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЯХ

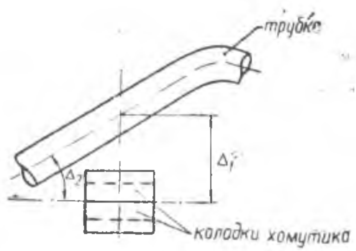
Монтажные напряжения в трубопроводах возникают за счет несовпадения сечений, в которых закрепляются трубки, с местами крепления.

Монтажные напряжения снижают сопротивление трубопровода вибрациям. Это снижение является существенным, так как монтажные напряжения, даже при небольших неточностях, превышают предел текучести.

В настоящей статье приведены результаты решения упруго-пластической задачи.



Фиг. 1.

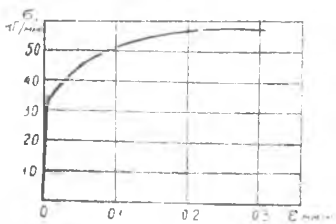


Фиг. 2.

На фиг. 1 показаны неточности при монтаже свободного конца турбопровода. Недотяг Δ_1 и несоосность Δ_2 являются линейными неточностями, перекос Δ_3 — угловая неточность. Неточности при монтаже промежуточного сечения трубопровода показаны на фиг. 2, где Δ_1 — несоосность и Δ_2 — перекос. Всего — пять частных случаев, которые ниже подробно исследуются для трубопроводов из стали 1Х18Н9Т.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТОВ

Выбор неточностей при монтаже происходит за счет изгиба трубопровода. Деформация изгиба может осложняться кручением. В упруго-пластических расчетах при изгибе используется диаграмма изгиба. Для построения диаграммы изгиба была получена диаграмма растяжения трубки из стали 1Х18Н9Т (фиг. 3). Для $\varepsilon > \varepsilon_s$ диаграмма растяжения была представлена аналитически по трем точкам с помощью полинома 2-й степени.



Фиг. 3.

$$\sigma = c_1 + c_2\varepsilon + c_3\varepsilon^2,$$

где

$c_1 = 31{,}7$ $кГ/мм^2$ $c_2 = 197{,}5$ $кГ/мм^2$

$c_3 = -361$ $кГ/мм^2$.

Обозначим через d — внутренний диаметр, и через D — наружный диаметр трубки.

Введем обозначение для отношения диаметров $\frac{d}{D} = \gamma$. В упруго — пластической стадии изгибающий момент в сечении вычисляется по формуле

$$M = \frac{D^2}{2\varepsilon^2_{max}} \int\limits_0^{\varepsilon_{max}} \sigma \cdot b \cdot \varepsilon \cdot d\varepsilon. \tag{1}$$

Следует рассматривать два случая положения границы между упругой и пластической областью в сечении.

Первый случай, когда указанная граница находится в пределах толщины трубки и второй случай, когда граница расположена в пределах отверстия.

Для первого случая формула (1) принимает следующий вид:

$$M = \frac{D^2}{2\varepsilon^2_{max}} \left\{ \int\limits_0^{\gamma\varepsilon_{max}} Eb'\varepsilon^2 d\varepsilon + \int\limits_{\gamma\varepsilon_{max}}^{\varepsilon_s} Eb\varepsilon^2 d\varepsilon + \int\limits_{\varepsilon_s}^{\varepsilon_{max}} (c_1 + c_2\varepsilon + c_3\varepsilon^2)\, b \cdot \varepsilon \cdot d\varepsilon \right\}. \tag{2}$$

Формулы для ширины сечения:

$$b = 2\sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - y^2} \text{ или } b = \frac{2}{\varkappa}\sqrt{\varepsilon^2_{max} - \varepsilon^2}.$$

$$b' = 2\left[\sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - y^2} - \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - y^2}\right] \text{ или}$$

$$b' = \frac{2}{\varkappa}\left(\sqrt{\varepsilon^2_{max} - \varepsilon^2} - \sqrt{\gamma^2\varepsilon^2_{max} - \varepsilon^2}\right). \tag{3}$$

В формулах (2) и (3) приняты следующие обозначения;

b' — ширина сечения при $y \leq \frac{d}{2}$;

b — ширина сечения при $y > \frac{d}{2}$;

$\varkappa$ — кривизна изогнутой оси трубки в исследуемом сечении.

Формула (2) после подстановки соотношений (3):

$$M = \frac{D^2}{2\varepsilon^2_{\max}} \left\{ \int\limits_0^{\gamma\varepsilon_{\max}} \frac{2}{\varkappa} E \left[\sqrt{\varepsilon^2_{\max} - \varepsilon^2} - \sqrt{\gamma^2\varepsilon^2_{\max} - \varepsilon^2} \right] \varepsilon^2 \cdot d\varepsilon + \right.$$

$$+ \int\limits_{\gamma\varepsilon_{\max}}^{\varepsilon_s} E \frac{2}{\varkappa} \sqrt{\varepsilon^2_{\max} - \varepsilon^2} \cdot \varepsilon^2 \cdot d\varepsilon + \int\limits_{\varepsilon_s}^{\varepsilon_{\max}} \frac{2}{\varkappa} c_1 \sqrt{\varepsilon^2_{\max} - \varepsilon^2} \cdot \varepsilon \cdot d\varepsilon +$$

$$\left. + \int\limits_{\varepsilon_s}^{\varepsilon_{\max}} \frac{2}{\varkappa} c_2 \sqrt{\varepsilon^2_{\max} - \varepsilon^2} \cdot \varepsilon^2 \cdot d\varepsilon + \int\limits_{\varepsilon_s}^{\varepsilon_{\max}} \frac{2}{\varkappa} c_3 \sqrt{\varepsilon^2_{\max} - \varepsilon^2} \cdot \varepsilon^3 \cdot d\varepsilon \right\}$$

Учитывая, что

$$c_1 = E\varepsilon_s - c_2\varepsilon_s - c_3\varepsilon_s^2$$

и момент, при котором появляются первые пластические деформации

$$M = \frac{\pi D^3}{32} (1 - \gamma^4) E\varepsilon_s$$

получим после вычисления интегралов:

$$\frac{M}{M_s} = \frac{1}{1 - \gamma^4} \left\{ \left[\left(\frac{4}{3\pi} - \frac{4c_2}{3\pi E} - \frac{16c_3\varepsilon_s}{3\pi E} + \frac{16c_3\varepsilon_s}{3\pi E} \frac{\varkappa^2}{\varkappa_s^2} \right) \left(1 - \frac{\varkappa_s^2}{\varkappa^2} \right) + \right.\right.$$

$$\left. + \frac{2(E - c_2)}{\pi E} - \frac{16c_3\varepsilon_s}{5\pi E} \left(\frac{\varkappa}{\varkappa_s} \right)^2 \left(1 - \frac{\varkappa_s^2}{\varkappa^2} \right) \right] \sqrt{1 - \frac{\varkappa_s^2}{\varkappa^2}} +$$

$$\left. + \frac{2(E - c^2)}{\pi E} \cdot \frac{\varkappa}{\varkappa_s} \arcsin \frac{\varkappa_s}{\varkappa} + \frac{c_2 - \gamma^4 E}{E} \cdot \frac{\varkappa}{\varkappa_s} \right\} \ldots \qquad (4)$$

$\varkappa_s$ — кривизна, при которой в сечении появляются первые пластические деформации.

Соотношение (4) справедливо для $\gamma \leqslant \frac{\varkappa_s}{\varkappa} \leqslant 1$.

Если граница между упругой и пластической областью расположена в пределах отверстия, то формула (1) приобретает следующий вид:

$$M = \frac{D^2}{2\varepsilon^2_{\max}} \left\{ \int\limits_0^{\varepsilon_s} E \frac{2}{\varkappa} \left[\sqrt{\varepsilon^2_{\max} - \varepsilon^2} - \sqrt{\gamma^2\varepsilon^2_{\max} - \varepsilon^2} \right] \varepsilon^2 \cdot d\varepsilon + \right.$$

$$\int\limits_{\varepsilon_s}^{\gamma\varepsilon_{\max}} (c_1 + c_2\varepsilon + c_3\varepsilon^2) \frac{2}{\varkappa} \left[\sqrt{\varepsilon^2_{\max} - \varepsilon^2} - \sqrt{\gamma^2\varepsilon^2_{\max} - \varepsilon^2} \right] \cdot \varepsilon \cdot d\varepsilon +$$

$$\left. + \frac{2}{x} \int\limits_{\gamma\varepsilon_{\max}}^{\varepsilon_{\max}} (c_1 + c_2\varepsilon + c_3\varepsilon^2) \sqrt{\varepsilon^2_{\max} - \varepsilon^2} \cdot \varepsilon \cdot d\varepsilon \right\}.$$

После вычисления интегралов

$$\frac{M}{M_s} = \frac{1}{1-\gamma^4}\left\{\left[\frac{4}{3\pi} - \frac{4c^2}{3\pi E} - \frac{16c_3\varepsilon_s}{3\pi E} + \frac{16c_3\varepsilon_s}{3\pi E}\left(\frac{\varkappa}{\varkappa_s}\right)^2\right]\sqrt{\left(1-\frac{\varkappa_s^2}{\varkappa^2}\right)^3} + \right.$$

$$+ \frac{2(E-c_2)}{\pi E}\sqrt{1-\frac{\varkappa_s^2}{\varkappa^2}} + \left[-\frac{4}{3\pi} + \frac{4c_2}{3\pi E} + \frac{16c_3\varepsilon_s}{3\pi E} - \right.$$

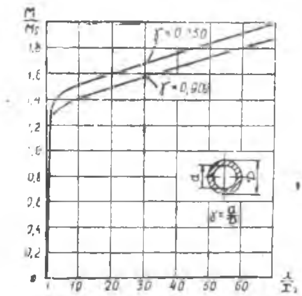
$$\left. - \frac{16\gamma^2 c_3\varepsilon_3}{3\pi E}\left(\frac{\varkappa}{\varkappa_s}\right)^2\right]\cdot\sqrt{\left(\gamma^2-\frac{\varkappa_s^2}{\varkappa^2}\right)^3} +$$

$$+ \frac{2\gamma^4}{\pi E}\cdot\frac{\varkappa}{\varkappa_s}(c_2-E)\arcsin\frac{1}{\gamma}\cdot\frac{\varkappa}{\varkappa_s} + \frac{2\gamma^2}{\pi E}(c_2-E)\sqrt{\gamma^2-\frac{\varkappa_s^2}{\varkappa^2}} +$$

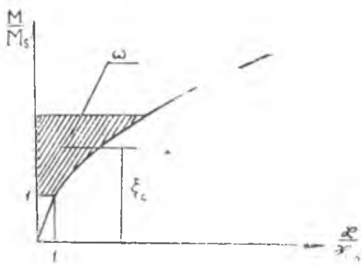
$$+ \frac{c_2}{E}\cdot\frac{\varkappa}{\varkappa_s}(1-\gamma^4) - \frac{16c_3\varepsilon_s}{5\pi E}\left(\frac{\varkappa}{\varkappa_s}\right)^2\sqrt{\left(1-\frac{\varkappa_s^2}{\varkappa^2}\right)^5} +$$

$$\left. + \frac{16c_3\varepsilon_s}{5\pi E}\left(\frac{\varkappa}{x_s}\right)^2\sqrt{\left(\gamma^2-\frac{\varkappa_s^2}{\varkappa^2}\right)^5} + \frac{2(E-c_2)}{\pi E}\,\frac{\varkappa}{\varkappa_s}\arcsin\frac{\varkappa_s}{\varkappa}\right\}\ldots \quad (5)$$

Формула (5) применима для $\frac{\varkappa_s}{\varkappa} \leqslant \gamma$.



Фиг. 4.



Фиг. 5.

По формулам (4) и (5) для 2-х значений γ построены диаграммы изгиба (фиг. 4).

Для дальнейших расчетов необходимо знать площадь с диаграммы изгиба (заштрихованная площадь) и положение центра тяжести этой площади ξ_c (фиг. 5). Вычисления ω и ξ_c было проведено по диаграмме изгиба с использованием формулы Симпсона. Результаты вычислений приведены в таблице 1.

НЕТОЧНОСТЬ «ПЕРЕКОС» НА СВОБОДНОМ КОНЦЕ ТРУБОПРОВОДА

Изучаемая неточность изображена на фиг. 1 и обозначена через Δ_3. В данном случае при монтаже наибольший изгибающий момент действует в монтируемом сечении. Первые пластические деформации появляются именно в этом сечении, после чего выбор неточности происходит за счет развития пластических деформаций в зоне, где они появились в первую очередь. Поэтому, после воз-

Таблица 1

$\gamma = 0,909$				$\gamma = 0,750$			
$\frac{M}{M_s}$	$\frac{\varkappa}{\varkappa_s}$	ω	ξ_c	$\frac{M}{M_s}$	$\frac{\varkappa}{\varkappa_s}$	ω	ξ_c
1,1	1,1	0,1017	1,0508	1,1522	1,1	0,1550	1,0773
1,2	1,4	0,2233	1,1060	1,3043	1,4	0,3398	1,1612
1,3	2,8	0,4133	1,1750	1,4565	5,0	0,7354	1,2886
1,4	9,2	0,9467	1,2792	1,6086	20,6	2,6425	1,4760
1,5	20,6	2,4034	1,3867	1,7608	39,4	7,1870	1,6130
1,6	33,4	5,1168	1,4754	1,9130	60,0	14,6987	1,7301
1,7	45,4	9,0435	1,5523	—	—	—	—
1,8	59,2	14,2670	1,6255	—	—	—	—
1,9	75,6	21,0071	1,6982	—	—	—	—
2,0	94,0	29,4706	1,7710	—	—	—	—

никновения первых пластических деформаций, конфигурация трубопровода будет проявляться через градиент изгибающего момента в месте с $M_{\text{наиб}}$.

В связи с этим было рассмотрено пять схем с различным градиентом изгибающего момента, которые охватывают широкий диапазон конфигурации трубопроводов (фиг. 6). Все схемы, кроме первой, статически неопределимы. Для раскрытия статической неопределимости использовалось то обстоятельство, что часть перемещений монтируемого сечения равна нулю. При вычислении перемещений применялся интеграл Мора

$$\Delta = \int \varkappa \overline{M} \, ds \ldots \tag{6}$$

где $\varkappa$ — кривизна изогнутой оси трубки в текущем сечении и $\overline{M}$ изгибающий момент от единичного силового фактора.

Для вычислений по формуле (6) использовались данные, приведенные в таблице 1.

Результаты решения указанных пяти схем сведены в табл. 2. Номера расчетных схем обозначены на фиг. 6. Через Δ обозначен исходный перекос, Δ_s — перекос, при котором появляются первые пластические деформации, ε_{max}—наибольшее относительное удлинение, которое для приведенных схем наблюдается в монтируемом сечении.

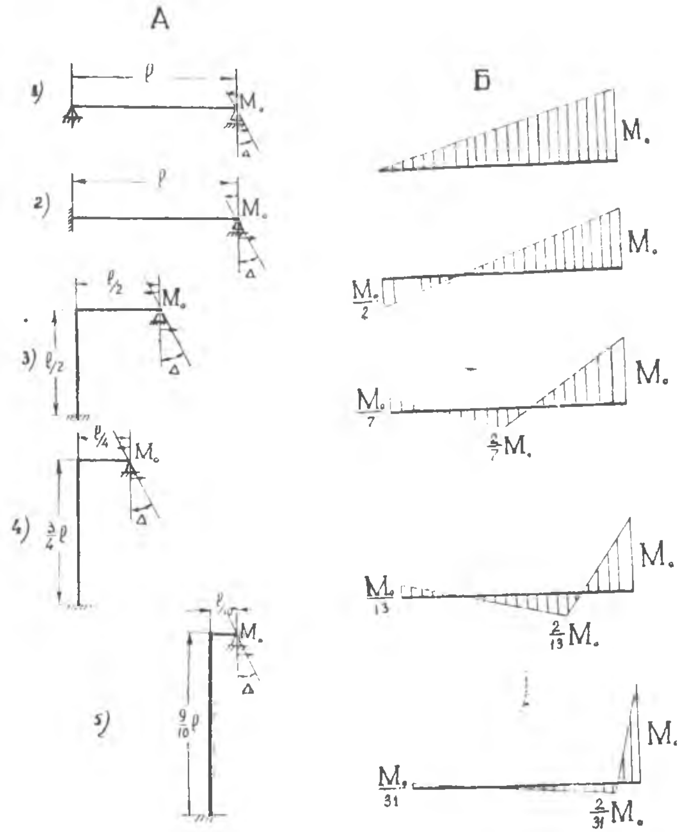
Результаты, приведенные в таблице 2, говорят о том, что градиент изгибающего момента мало влияет на зависимость

$$\frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_s} = f\left(\frac{\Delta}{\Delta_s}\right)$$

При упруго — пластическом деформировании конфигурация трубопровода сказывается на зависимость $\frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_s} = f\left(\frac{\Delta}{\Delta_s}\right)$ через градиент момента в районе с $M_{наиб}$. В связи с этим можно считать, что конфигурация трубопровода мало влияет на зависимость

$$\frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_s} = f\left(\frac{\Delta}{\Delta_s}\right).$$

Это заключение справедливо и для пространственных трубопроводов, хотя расчеты проведены только для плоских трубопроводов.



Фиг. 6. А — Расчетные схемы, *Б* — эпюры изгибающих моментов в упругой стадии.

При построении эпюр моментов ось трубки при сохранении длины представлялась прямой линией

Таблица 2

$\gamma = 0,909$						$\gamma = 0,750$	
номера схем							номер схемы
	1	2	3	4	5		5
$\frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_s}$	$\frac{\Delta}{\Delta_s}$	$\frac{\Delta}{\Delta_s}$	$\frac{\Delta}{\Delta_s}$	$\frac{\Delta}{\Delta_s}$	$\frac{\Delta}{\Delta_s}$	$\frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_s}$	$\frac{\Delta}{\Delta_s}$
1,1	1,091	1,091	1,093	1,096	1,091	1,1	1,149
1,4	1,209	1,208	1,207	1,206	1,212	1,4	1,280
2,8	1,453	1,436	1,439	1,448	1,453	5,0	1,806
9,2	2,364	2,250	2,270	2,294	2,364	20,6	4,786
20,6	4,888	4,425	4,492	4,618	4,737	39,4	10,902
33,4	9,237	7,922	8,087	8,414	8,819	60,0	19,221
45,4	14,919	—	12,393	13,031	13,835	—	—
59,2	21,782	—	17,155	18,199	19,640	—	—
75,6	29,923	—	—	23,928	26,190	—	—
94,0	39,380	—	—	30,166	33,397	—	—

НЕТОЧНОСТИ «НЕДОТЯГ» И «НЕСООСНОСТЬ» НА СВОБОДНОМ КОНЦЕ ТРУБОПРОВОДА

Изучаемые неточности изображены на фиг. 1. Через Δ_1 обозначена неточность «недотяг», а через Δ_2 — «несоосность».

Рассматривались пять схем для неточности «несоосность», которые охватывают широкий диапазон градиента изгибающего момента в районе с $M_{наиб}$, следовательно, широкий диапазон конфигураций трубопроводов (фиг. 7).

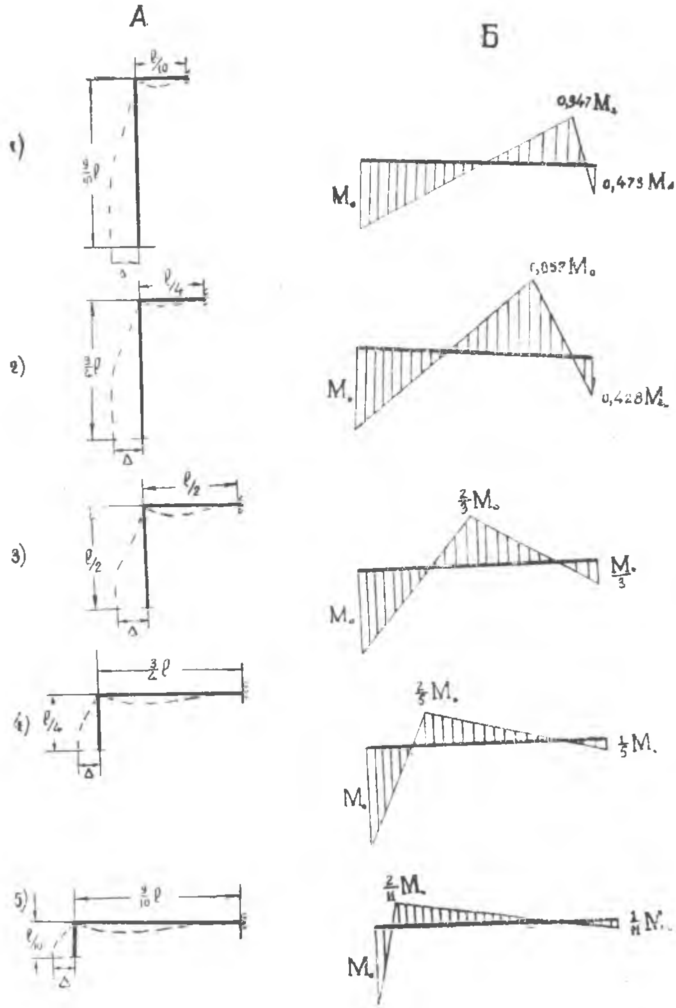
Результаты решения указанных пяти схем сведены в таблицу 3. Номера расчетных схем обозначены на фиг. 7

Через Δ обозначена исходная несоосность, Δ_s — несоосность, при которой появляются первые пластические деформации.

ε_{max} — наибольшее относительное удлинение, которое для приведенных схем наблюдаются в монтируемом сечении.

Цифры, приведенные в таблице 3, говорят о том, что градиент изгибающего момента, а следовательно, и конфигурация трубопровода мало влияют на зависимость $\frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_s} = f\left(\frac{\Delta}{\Delta_s}\right)$.

Полученные результаты можно использовать и для неточности «недотяг», т. к. расчеты по этой неточности приводят к тем же схемам. Однако в этом случае ε_{max} имеет место не в монтируемом сечении, а сечении на другом конце трубопровода.



Фиг. 7. *А* — расчетные схемы, *Б* — эпюры изгибающих моментов в упругой стадии.

При построении эпюр моментов ось трубки при сохранении длины представлялась прямой линией.

Таблица 3

$\gamma = 0,909$									
номера схем									
1		2		3		4		5	
$\frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_s}$	$\frac{\Delta}{\Delta_s}$	$\frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_s}$	$\frac{\Delta}{\Delta_s}$	$\frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_s}$	$\frac{\Delta}{\Delta_s}$	$\frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_s}$	$\frac{\Delta}{\Delta_s}$	$\frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_s}$	$\frac{\Delta}{\Delta_s}$
1,15	1,1616	1,1	1,094	1,1	1,033	1,1	1,092	1,1	1,092
1,75	1,292	1,8	1,313	1,4	1,153	1,4	1,221	1,4	1,208
3,6	1,575	3,2	1,479	2,8	1,406	2,8	1,457	2,8	1,434
12,2	2,559	6,8	1,826	7,2	1,826	9,2	2,170	9,2	2,200
24,2	5,281	16,6	2,964	11,2	2,333	21,6	3,441	20,6	4,050
36,1	9,916	28,2	6,049	15,6	2,791	24,4	3,868	33,4	6,722
—	—	40,4	11,225	23,6	4,348	28,1	4,672	—	—
—	—	—	—	36,4	8,492	37,0	7,402	—	—
—	—	—	—	53,0	15,252	57,0	14,540	—	—

Таблица 4

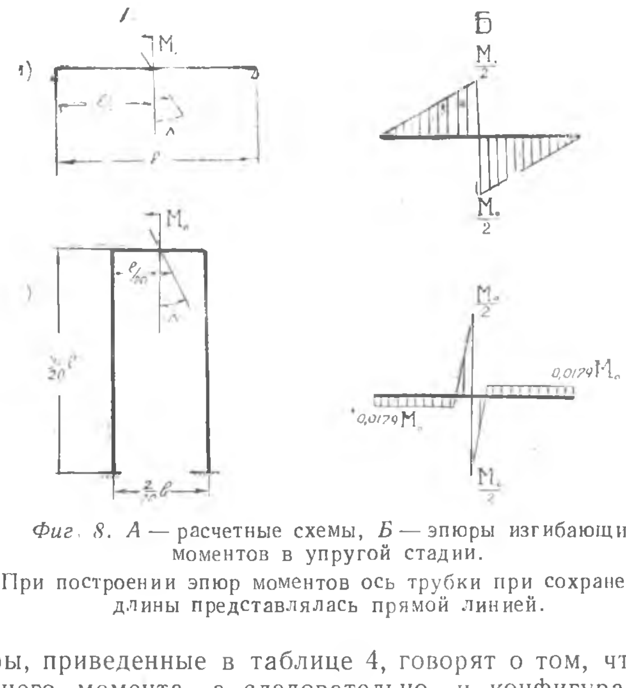
$\gamma = 0,909$			$\gamma = 0,750$	
	номера схем			номер схемы
$\frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_s}$	1	2	$\frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_s}$	1
	$\frac{\Delta}{\Delta_s}$	$\frac{\Delta}{\Delta_s}$		$\frac{\Delta}{\Delta_s}$
1,1	1,091	1,113	1,1	1,130
1,4	1,209	1,232	1,4	1,284
2,8	1,454	1,485	5,0	1,812
9,2	2,364	2,439	20,6	4,908
20,6	4,888	5,024	39,4	11,540
33,4	9,237	9,186	60,0	21,121
45,4	14,919	14,845	—	—
59,2	21,782	21,409	—	—
75,6	29,923	—	—	—
94,0	39,380	—	—	—

НЕТОЧНОСТЬ «ПЕРЕКОС» В ПРОМЕЖУТОЧНОМ СЕЧЕНИИ ТРУБОПРОВОДА (КРЕПЛЕНИЕ ТРУБКИ КОЛОДКАМИ ЗАЖИМА)

Неточность «перекос» изображена на фиг. 2 и обозначена через Δ_2. Для указанной неточности были решены 2-е схемы, которые охватывают широкий диапазон градиента изгибающего момента и, следовательно, широкий диапазон конфигураций трубопроводов (фиг. 8). Результаты решения указанных схем сведены в таблицу 4. Номера расчетных схем обозначены на фиг. 8. Через Δ обозначен исходный перекос,

Δ_s — перекос, при котором появляются первые пластические деформации.

ε_{max} — наибольшее относительное удлинение,[3] которое для приведенных схем наблюдается в монтируемом сечении.



Фиг. 8. А — расчетные схемы, *Б* — эпюры изгибающих моментов в упругой стадии.

При построении эпюр моментов ось трубки при сохранении длины представлялась прямой линией.

Цифры, приведенные в таблице 4, говорят о том, что градиент изгибающего момента, а следовательно, и конфигурация трубопровода, мало влияют на зависимость $\frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_s} = f\left(\frac{\Delta}{\Delta_s}\right)$.

НЕТОЧНОСТЬ «НЕСООСНОСТЬ» В ПРОМЕЖУТОЧНОМ СЕЧЕНИИ ТРУБОПРОВОДА (КРЕПЛЕНИЕ ТРУБКИ КОЛОДКАМИ ЗАЖИМА)

Неточность «несоосность» изображена на фиг. 2 и обозначена через Δ_1. Для этой неточности были решены три схемы, охватывающие широкий диапазон градиента изгибающего момента и, сле-

Таблица 5

	$\gamma = 0{,}909$			$\gamma = 0{,}750$	
	номера схем			номера схем	
	1	2	3	2	3
$\frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_s}$	$\frac{\Delta}{\Delta_s}$	$\frac{\Delta}{\Delta_s}$	$\frac{\Delta}{\Delta_s}$	$\frac{\varepsilon_{max}}{\Delta_s}$	$\frac{\Delta}{\Delta_s}$
1,1	1,091	1,080	1,092	1,1	1,107
1,4	1,209	1,170	1,206	1,4	1,239
2,8	1,454	1,364	1,429	5,0	1,648
9,2	2,364	2,121	2,199	20,6	4,338
20,6	4,888	4,268	4,048	3,94	10,520
33,4	9,237	8,097	6,715	60,0	20,356
45,4	14,901	13,363	—	—	—
59,6	21,782	20,129	—	—	—
75,6	29,923	28,704	—	—	—
94,0	39,397	39,380	—	—	—

довательно, широкий диапазон конфигураций трубопроводов. (фиг. 9).

Результаты решения приведенных выше схем сведены в таблицу 5.

Через Δ обозначена исходная несоосность, Δ_s — несоосность, при которой появляются первые пластические деформации.

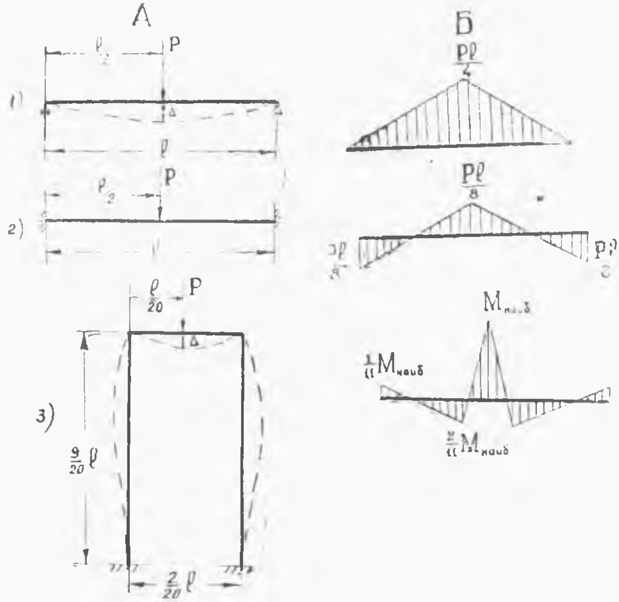
ε_{max} —наибольшее относительное удлинение, которое для приведенных схем наблюдается в монтируемом сечении. Результаты расчета (таблица 5) говорят о том, что градиент изгибающего момента, а следовательно, и конфигурация трубопровода мало влияют на зависимость.

$$\frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_s} = f\left(\frac{\Delta}{\Delta_s}\right).$$

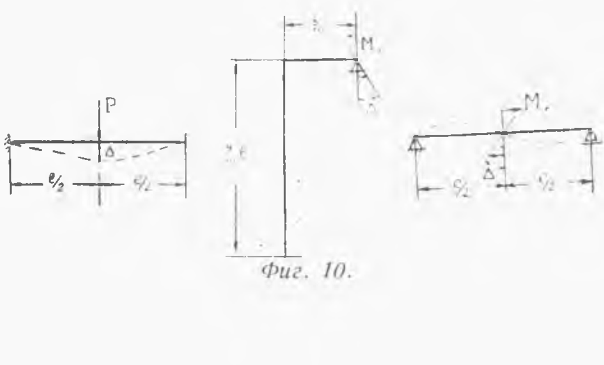
АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

а) Основные расчеты выполнены для $\gamma = 0{,}909$. Величина γ зависит от наружного диаметра трубки.

Размер сечения трубки, *мм*	6×8	10×12	16×18	20×22
	0,750	0,833	0,889	0,909

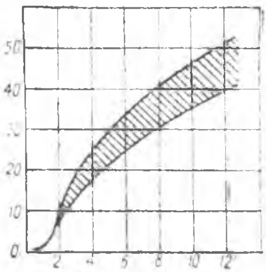


Фиг 9. *А* — расчетные схемы, *Б* — эпюры изгибающих моментов в упругой стадии.
При построении эпюр моментов ось трубки при сохранении длины представлялась прямой линией.



Фиг. 10.

Для вычисления влияния диаметра на зависимость $\frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_s} = f\left(\frac{\Delta}{\Delta_s}\right)$ были проведены вычисления для 3-х случаев при $\gamma = 0{,}750$ (фиг. 10). Результаты вычислений приводятся в таблицах 2, 4, и 5. Анализируя эти результаты, можно сделать заключения, что γ, а следовательно, и диаметр трубки практически не влияет на зависимость $\frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_s} = f\left(\frac{\Delta}{\Delta_s}\right)$. б) Результаты выполненных выше расчетов приведены на фиг. 11. Расчетные точки для всех неточностей и схем расположены в сравнительно узкой заштрихованной области. Следовательно, конфигурация трубопровода, диаметр и тип неточности мало влияют на зависимость $\frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_s} = f\left(\frac{\Delta}{\Delta_s}\right)$. Расчеты были выполнены для простых неточностей. Полученную зависимость $\frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_s} = f\left(\frac{\Delta}{\Delta_s}\right)$ можно применить и для сложной неточности, т. е. для сочетания простых неточностей. В этом случае в качестве Δ и Δ_s можно рассматривать проекции суммарного перемещения на любое направление.



Фиг. 11.

Отношение не зависит от выбранного направления, в котором измеряются перемещения.

Применение полученных результатов для сложных неточностей возможно благодаря тому, что при сложной неточности изменяется только градиент изгибающего момента в сечении с $M_{наиб}$ а, последний, как установлено выше, мало влияет на основную зависимость.

Зависимость $\frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_s} = f\left(\frac{\Delta}{\Delta_s}\right)$ получена при расчете плоских трубопроводов. Учитывая, что при пластическом деформировании перемещения происходят за счет развития пластических деформаций на небольшом участке трубопровода, полученные результаты можно применять и к пространственным трубопроводам. Можно предположить, что деформация кручения, которая может наблюдаться, не исказит основной зависимости.

ПОРЯДОК ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОНТАЖНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

а) Неточность Δ, которая имеет место при монтаже, выбирается ступенями. После добавления каждой последующей ступени трубопровод освобождается и с помощью индикатора устанавливается возвращение монтируемого сечения в положение до монтажа. Таким путем определяется Δ_s равное перемешению, начиная с которого монтируемое сечение не возвращается в исходное положение.

После полного закрепления соединения, по показанию индикатора устанавливается перемещение по направлению ножки индикатора Δ.

Перемещения Δ и Δ_s нужно определять обязательно в монтируемом сечении, т. к. чаще всего область пластических деформаций примыкает к этому сечению.

По отношению $\frac{\Delta}{\Delta_s}$ определяется $\frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_s}$ с помощью графика фиг. 11. При этом используется верхняя граница заштрихованной области, отмеченная жирной линией. По ε_{max} с помощью графика на фиг. 3 определяется наибольшее монтажное напряжение ε_{max}.

б) Выше изложен порядок вычисления монтажных напряжений, превышающих предел текучести. Если наибольшие монтажные напряжения ниже предела текучести, то можно, занижая возможности трубопровода, считать при оценке прочности $\sigma_{max} = \sigma_s$.

Есть возможность оценить и упругие монтажные напряжения. Задавая монтируемому сечению ступенями перемещение, превышающее фактическую неточность Δ, можно определить Δ_s.

Наибольшее монтажное напряжение в этом случае вычисляется по формуле: $\sigma_{max} = \frac{\Delta}{\Delta_s} \sigma_s$.