

Осевое удлинение	6.1.
Допустимая длина прямого участка	6.2.
Термическое предварительное натяжение	6.3.

**Осевое удлинение**

**6.1.**

Как известно, при изменении температуры все материалы изменяются в объеме. Для системы изолированных труб значение имеют только осевые изменения длины, которые возникают от силы трения между трубой- оболочкой и грунтом (песчанной подушкой).

В результате действия этих двух сил в стальной трубе возникают определенные напряжения. Нашей задачей является:

- не допустить превышения предельно допустимых значений напряжений;
- оптимально компенсировать изменения длины трубопроводов.

Под "свободным удлинением" понимают беспрепятственное изменение длины какого-либо участка трубопровода, возникающее при изменении температуры:

$$\Delta L = \alpha \cdot L_x \cdot \Delta t \text{ [мм]},$$

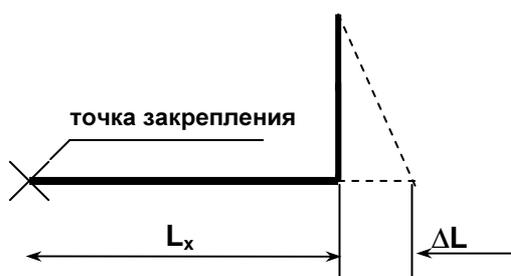
где

$\Delta L$  – удлинение стальной трубы, мм;

$\alpha$  – коэффициент линейного расширения, для стали  $\alpha = 1.2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ;

$L_x$  – длина прямого участка трубы, мм;

$\Delta t$  – разность между конечной температурой  $t_k$  и исходной температурой  $t_{исх}$ , °K.



В уложенном в песок и засыпанном состоянии удлинение трубопровода при увеличении температуры (в противоположность "свободному удлинению") сильно ограничено, поскольку в результате осевого удлинения возникают силы трения  $F_{тр}$  между трубой - оболочкой и окружающим ее грунтом. Сила трения зависит от коэффициента трения и суммы нормальных усилий, которые воздействуют на изолированную трубу.

Нормальными усилиями являются усилия, которые воздействуют на трубопровод в перпендикулярном направлении к оси изолированных труб - грунт, внешние нагрузки, вес трубопровода с находящейся в нем водой.

$$F_{тр} = \mu \cdot \Sigma F_n \text{ [Н/м]},$$

где

$\mu$  - коэффициент трения,  $\mu = 0,4$ ;

$\Sigma F_n$  - сумма нормальных усилий на 1 погонный метр трубы, Н/м.

Сила трения  $F_{тр}$  передается полиэтиленовой трубой - оболочкой через твердую полиуретановую пену на стальную трубу.

Суммарная сила трения, которая воздействует на участок изолированной трубы, пропорциональна длине этого участка.

**Допустимая длина прямого участка**

**6.2.**

Величина силы термического растяжения  $F_p$  по всей длине прямого участка постоянна. Против силы растяжения действует сила трения  $F_{тр}$ , тем самым уменьшая действительное удлинение трубопровода.

На участке, где суммирующаяся сила трения  $\Sigma F_{тр}$ , воздействующая на трубопровод, меньше силы растяжения  $F_p$ , возникает удлинение трубопровода и этот участок называется участком скольжения.

В случае, если суммирующаяся сила  $\Sigma F_{тр}$  больше силы растяжения  $F_p$ , трубопровод на этом участке не удлиняется и этот участок называется фиксированным.

Для силы растяжения действительна следующая формула:

$$F_p = A \cdot \sigma_x \text{ [Н]},$$

где

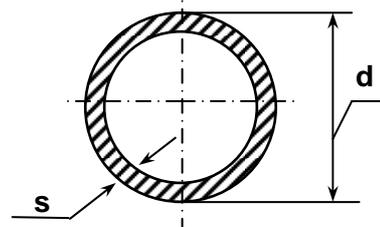
- A - площадь сечения стальной трубы, мм<sup>2</sup>;
- $\sigma_x$  - возникающее напряжение сжатия или растяжения, Н/мм<sup>2</sup>.

Площадь сечения определяется при помощи следующей формулы:

$$A = (d - s) \cdot \pi \cdot s \text{ [мм}^2\text{]},$$

где

- d - наружный диаметр стальной трубы [мм],
- s - толщина стенки стальной трубы [мм].



**Допустимая длина прямого участка**

**6.2.**

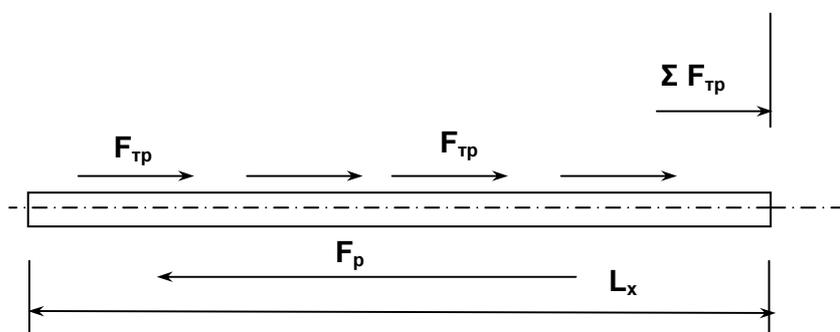
Исходя из ранее приведенных определений, суммарная сила трения  $\Sigma F_{\text{тр}}$  определяется по формуле:

$$\Sigma F_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} \cdot L_x \text{ [Н]},$$

где

$F_{\text{тр}}$  - сила трения на 1 погонный метр трубы, Н/м;

$L_x$  - длина трубы, м.



Суммарная сила трения  $\Sigma F_{\text{тр}}$  создает в стальной трубе осевое напряжение:

$$\sigma_0 = \frac{\Sigma F_{\text{тр}}}{A} \text{ [Н/мм}^2\text{]},$$

где

$\sigma_0$  - осевое напряжение, Н/мм<sup>2</sup>;

$A$  - площадь сечения стальной трубы, мм<sup>2</sup>.

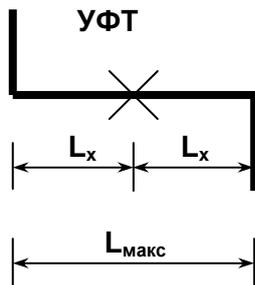
**Допустимая длина прямого участка**

**6.2.**

При ограничении осевого напряжения  $\sigma_0$  до максимально допустимой величины  $\sigma$ , всегда можно получить длину  $L_x$ , при которой силы трения находятся в равновесии с силой растяжения  $F_{тр}$ .

$$F_{тр} \cdot L_x = F_p$$

$$F_{тр} \cdot L_x = A \cdot \sigma$$



Отсюда следует:

$$L_x = \frac{F_p}{F_{тр}} = \frac{A \cdot \sigma}{F_{тр}}$$

$$L_{\text{макс}} = 2 \cdot L_x \text{ [м]}$$

Допустимая длина укладки  $L_{\text{макс}}$  зависит от следующих параметров:

- наружного диаметра стальной трубы  $d$  и толщины стенки  $s$ ;
- наружного диаметра трубы – оболочки  $D$ ;
- высоты засыпки (глубины укладки труб);
- максимально допустимого осевого напряжения  $\sigma$ .

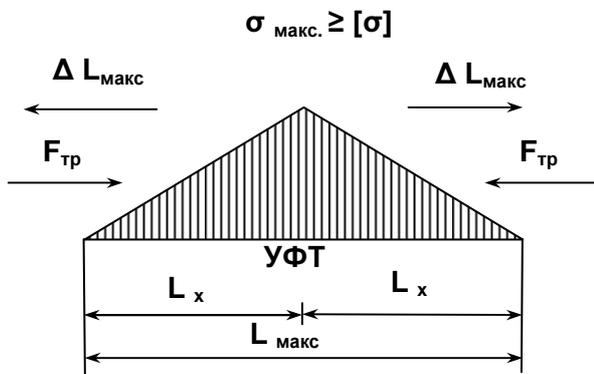
Допустимая длина прямого участка

6.2.

Так как удельная сила трения направлена противоположно направлению осевого удлинения, она равномерно суммируясь с концов трубы, в середине участка достигает максимальной величины и уравнивается.

Указанную точку покоя называют условной фиксированной точкой **УФТ**, из которой трубопровод равномерно удлиняется в обоих направлениях на величину  $\Delta L$ .

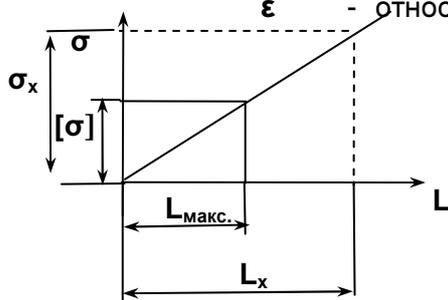
В результате этого, в точке **УФТ** устанавливается максимальное осевое напряжение  $\sigma_{\text{макс}}$ , которое впоследствии необходимо ограничить до  $\sigma$  и величина которого уменьшается линейно по направлению к концам трубы.



При превышении допустимой длины укладки  $L_{\text{макс}}$ , осевые напряжения также пропорционально увеличиваются до значений, превосходящих максимально допустимые величины  $\sigma$ . Для того, чтобы избежать превышения осевого напряжения даже при длине трассы более  $L_{\text{макс}}$ , ограничение напряжений может быть осуществлено путем термического предварительного натяжения в открытой траншее. Согласно закону Гука, величина удлинения пропорциональна напряжению, следовательно:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad [\text{Н/мм}^2],$$

где  $E$  - модуль упругости,  $\text{Н/мм}^2$ ;  
 $\varepsilon$  - относительное удлинение  $\Delta L/L_x$ .



Для системы изолированных труб удлинение достигается путем подогрева стальной трубы на величину  $\Delta t$ .

Получаем выражения:

$$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta t$$

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta t \quad [\text{Н/мм}^2],$$

где

$\alpha$  - коэффициент линейного расширения стали,  $\text{K}^{-1}$ ;  
 $\Delta t$  - разность температур,  $^{\circ}\text{C}$ .

Таким образом, путем деления разности температур можно ограничить величину осевого напряжения до величины меньше допустимой.

**ПРИМЕР:**

Максимальная рабочая температура сети  $t_{\text{макс}} = 95 \text{ }^\circ\text{C}$ .

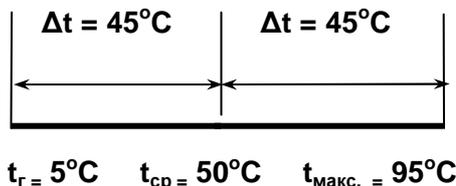
Температура грунта  $t_r = 5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Длина прямого участка  $L > L_{\text{макс}}$ .

Для стальной трубы **St 37.0** в качестве постоянных величин приняты:

модуль упругости  $E = 2,05 \cdot 10^5 \text{ Н/мм}^2$ ;

коэффициент линейного расширения  $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ , K}^{-1}$ .



Определим осевое напряжение:

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta t$$

$$\sigma = 2,05 \cdot 10^5 \cdot 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 90 = 221,4 \text{ Н/мм}^2.$$

Допустимое осевое напряжение  $\sigma = 150 \text{ Н/мм}^2$  превышено.

**Если трубопровод подвергнуть термическому предварительному натяжению при температуре  $t_{\text{cp}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ , разность температур уменьшится на половину и вместе с ней уменьшится и возникающее напряжение.**

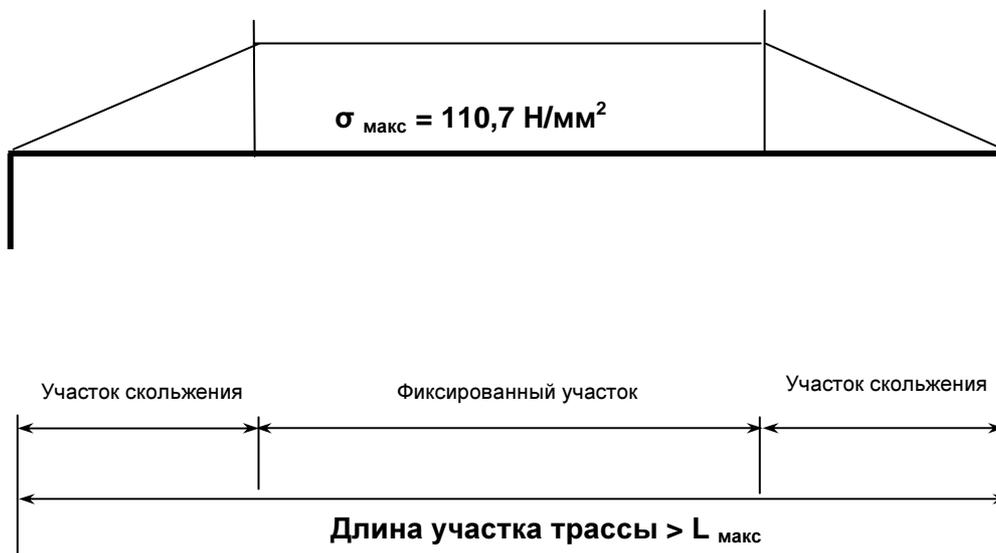
$$\Delta t = (t_{\text{макс}} - t_r) / 2$$

$$\Delta t = (95 - 5) / 2 = 45 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta t$$

$$\sigma = 2,05 \cdot 10^5 \cdot 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot 45 = 110,7 \text{ Н/мм}^2.$$

Если перенести все вышесказанное на практику и участок трубопровода перед засыпкой траншеи подогреть до средней температуры или температуры предварительного натяжения  $t_{\text{ср}}$ , можно укладывать участки произвольной длины. Поскольку разность  $\Delta t$  между температурами  $t_{\text{ср}}$  и  $t_{\text{макс}}$ , а также между  $t_{\text{ср}}$  и  $t_f$  всегда должна быть одинаковой, при  $t_{\text{макс}} = 95 \text{ }^\circ\text{C}$  максимальное осевое напряжение составляет  $110,7 \text{ Н/мм}^2$ . Непременным условием этого является то, что засыпку траншеи всегда следует осуществлять при температуре предварительного натяжения.



На основании равновесия сил средняя часть какого – либо участка предварительного натяжения не расширяется, следовательно, здесь наблюдается максимальное осевое напряжение. Указанный участок называют фиксированным участком, в котором всякое движение подавлено. В направлении обоих концов участка предварительного натяжения напряжение понижается, возникает осевое удлинение, ввиду чего эти два участка трассы называют участками скольжения.