

Устойчивость трубопроводов с осевыми сильфонными компенсаторами

Е.В. Кузин, директор, ООО «АТЕКС-инжиниринг», г. Иркутск; В.В. Логунов, заместитель генерального директора, В.Л. Поляков, главный конструктор проектов по теплотсетям, ОАО «НПП «Компенсатор», г. Санкт-Петербург

При проектировании трубопроводов с осевыми компенсаторами перед проектировщиками встает вопрос о проверке устойчивости такого трубопровода. Проверку устойчивости необходимо проводить для предотвращения возможного скидывания трубопровода со скользящих опор или разрушения трубопровода из-за превышения допустимых напряжений в стенке трубопровода при изгибе. Практический смысл расчета на устойчивость следующий – при осевом сжимающем усилии, действующем на трубопровод, равном критической силе, трубопровод, который был выведен некоторой силой, перпендикулярной оси трубопровода из состояния прямолинейного равновесия остается изогнутым после устранения отклоняющей силы. Если значение сжимающего усилия превышает значение критического усилия - тогда при устранении отклоняющей силы, отклонение трубопровода продолжит увеличиваться, и, наоборот.

Расчет в ПО «СТАРТ» не позволяет судить об устойчивости трубопровода, тем более что, при создании расчетной схемы проектировщики применяют идеальную модель трубопровода – не содержащую отклонений и деформаций, а это как мы покажем далее – необходимый фактор возможной потери устойчивости реального трубопровода.

На текущий момент, раздел проверки на устойчивость всех нормативных документов РФ по расчету теплопроводов содержит ограничения, не допускающие применение приводимой в документе методики при расчете трубопровода со значительными отклонениями от линейности (участки самокомпенсации), а также не допускающие расчет трубопровода с любыми осевыми компенсаторами – т.е. рассматривается некий теоретический прямолинейный трубопровод, зажаты между двумя неподвижными опорами, и не имеющий компенсации температурных деформаций вообще.

В данной статье авторы предложат подробную методику для проверки трубопровода с осевыми компенсаторами на устойчивость.

Применение осевых компенсаторов, нарушает сплошность трубопровода и привносит в систему силы, «распирающие» трубопровод в осевом направлении, практически не зависящие от температурной деформации. Если теряет устойчивость сплошной трубопровод, то происходит боковое отклонение участка с наименьшей устойчивостью от начального положения оси трубопровода. При этом трубопровод отклоняется на величину ограниченную температурным удлинением трубопровода. В случае же потери устойчивости трубопровода с осевым компенсатором отклонение трубопровода от его начального положения продолжается до полного растяжения компенсатора или до состояния, при котором распорное усилие компенсатора уравновешивается сопротивлением растяжению (возможно при небольших диаметрах или малых давлениях среды).

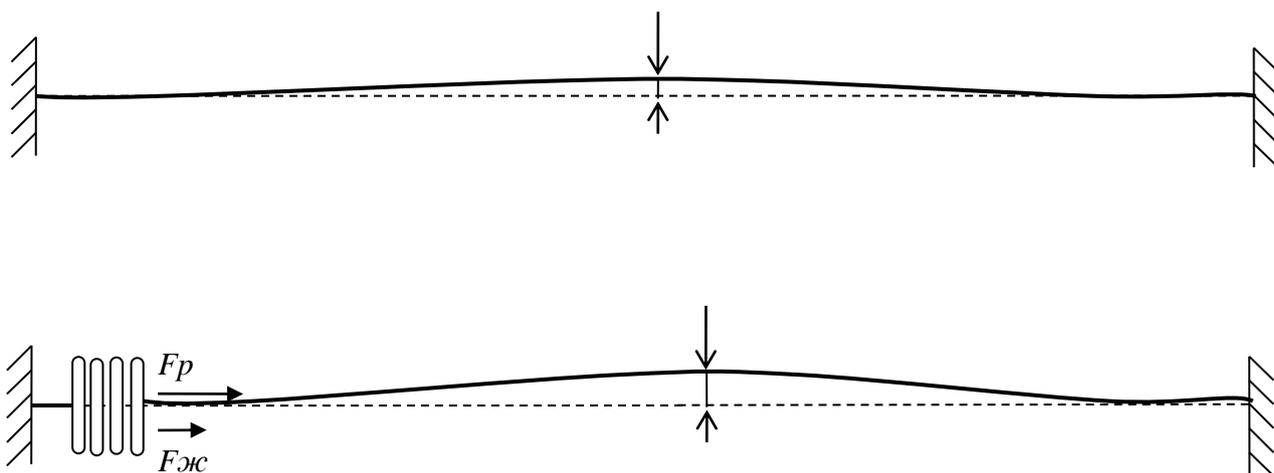


Рис 1. Потеря устойчивости трубопровода без компенсатора, и потеря устойчивости трубопровода с осевым компенсатором. Направляющие опоры условно не показаны.

При оценке устойчивости трубопроводной системы следует различать устойчивость трубопровода и устойчивость собственно сифонного компенсатора.

Устойчивость сифонного компенсатора разделяется на два типа:

- осевая (продольная) устойчивость. – устойчивость компенсатора как гибкого сжимаемого стержня. При потере устойчивости происходит изгиб продольной линии компенсатора. Чем больше компенсирующая способность сиффона и его длина, тем более жестким он должен быть. Чем больше эффективная площадь сиффона – тем более жестким должен быть компенсатор.
- локальная устойчивость (устойчивость в плоскости гофров) – при потере локальной устойчивости происходит изгиб или поворот плоскости гофра таким образом, что плоскость этих гофров больше не является перпендикулярной оси сиффона. Чаще всего это встречается у сиффонов с относительно маленьким отношением длины к диаметру при большой высоте гофра.



Рис 2. Потеря локальной устойчивости сифонным компенсатором. (Испытания).

Устойчивость собственно сиффона при нормальном перемещении его патрубков должен обеспечить завод-изготовитель. Нормальное перемещение патрубков компенсатора и устойчивость трубопровода должен обеспечить проектант своим проектным решением.

Обычно, в основе проверки на устойчивость лежит уравнение критической силы Эйлера.

$$P_k = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(\mu \cdot l)^2} \quad (1)$$

Где μ – коэффициент приведения длины - параметр, зависящий от способа закрепления концов трубопровода, конструкции компенсатора и наличия промежуточных (направляющих опор)

E - модуль упругости

I – момент инерции сечения

l – длина участка

Отдельно стоит остановиться на коэффициенте приведения длины μ , тем более что конструкция компенсатора и направляющих опор оказывают непосредственное влияние на этот параметр.

Осевые сильфонные компенсаторы по конструкции можно разделить на три типа.

1. – *простой сильфонный компенсатор*. Пренебрегая жесткостью компенсатора на сдвиг и поворот такой способ закрепления можно рассмотреть как свободный конец изгибаемого стержня. При этом имеется существенное замечание - чем больше несоосность компенсатора, тем большее он оказывает боковое усилие.
2. - *Сильфонный компенсатор с усиленным защитным направляющим кожухом*, допускает свободное продольное перемещение патрубков компенсатора, прочность конструкции достаточна, чтобы выдержать возникающие боковые усилия. В расчетной схеме можно рассмотреть, как сильфон, с внутренними шарнирными направляющими опорами. В ОАО «НПП «Компенсатор» обозначается как сильфонный осевой компенсатор с усиленным защитным кожухом.
3. - *Сильфонный компенсатор с защитным направляющим кожухом (СКУ)*, допускает свободное продольное перемещение патрубков компенсатора, прочность конструкции подобрана так, чтобы выдержать возникающие боковые усилия и изгибающие моменты. В расчетной схеме можно рассмотреть, как телескопическое устройство, допускающее только продольное перемещение трубопровода и передающее изгибающее усилие на трубопровод. В ОАО «НПП «Компенсатор» обозначается как сильфонное компенсационное устройство. СКУ по ТУ ИЯНШ.300260.033ТУ - единственный вид неразгруженных осевых сильфонных компенсаторов не требующий устройства направляющих опор для обеспечения работоспособности СКУ (обеспечения нормального перемещения патрубков сильфона), направляющие опоры устанавливаются только для неустойчивых трубопроводов. Аналогов СКУ по ИЯНШ.300260.033 ТУ сторонними производителями не производится.

Считаем важным выделить следующее – силы трения скользящих опор стабилизируют трубопровод в горизонтальной плоскости, вес трубопровода оказывает стабилизирующее воздействие в вертикальной плоскости. Расчет критической силы следует проводить, сначала для горизонтальной плоскости и затем - для вертикальной. При этом, если обеспечивается устойчивость в горизонтальной плоскости, расчет устойчивости в вертикальной плоскости проводить не требуется. Но если трубопровод неустойчив в горизонтальной плоскости его следует стабилизировать направляющими опорами и проверить на вертикальную устойчивость. **Такое разделение необходимо для снижения стоимости направляющих опор, т.к. для стабилизации в горизонтальной плоскости достаточно стандартных скользящих опор с направляющим элементом (например, уголки-бортики, приваренные к опорной пластине), а для стабилизации в вертикальной плоскости направляющая опора должна быть охватывающего типа.**

Расчетная схема реального горизонтального трубопровода стабилизируемого боковыми силами трения или веса трубопровода, не может относиться к классической задаче устойчивости, а

рассматривается авторами как продольно-поперечный изгиб. Т.к. если начальный прогиб отсутствует то и прогиб стабилизированного силами трения трубопровода невозможен, но в то же время начальный прогиб трубопровода определяет значение критического сжимающего усилия. Решение сводится к нахождению осевого сжимающего усилия, момент, от действия которого на начальный прогиб трубопровода превысит стабилизирующий момент от действия боковых сил.

Схема 1.

На участке трубопровода установлен простой сальфонный компенсатор или СК с защитным кожухом без направляющих опор, такую систему следует рассматривать как стержень изгибаемый сосредоточенной силой, приложенной к свободному концу. При такой схеме применения решающим фактором будет являться не устойчивость системы, а жесткость трубопровода на изгиб. Система может находиться в равновесном состоянии только в случае если сумма жесткости консольно закрепленного трубопровода и жесткости компенсатора на сдвиг, превышает боковые усилия сальфонного компенсатора при возможной несоосности – т.е. может применяться при очень малой длине трубопровода, большом моменте инерции сечения трубопровода (большом диаметре) или низком внутреннем давлении трубопровода. При появлении в системе небольшого эксцентриситета вектор распорного усилия сальфона отклоняется от оси трубопровода и создает боковое усилие, увеличивающее изгиб трубопровода и еще больше отклоняющий вектор распорного усилия. Возникает замкнутый цикл. Боковые силы такого рода не зависят от температурной деформации и уравниваются только при растяжении сальфонного компенсатора (разрыв многослойного компенсатора при давлениях не превышающем $1,5 P_y$ – невозможен).



Рис. 3,4,5. Изгиб трубопровода с сальфонным компенсатором, установленным по схеме 1. На рис.5 изображен разрыв однослойного компенсатора – крайне неустойчивой и ненадежной конструкции для тепловых сетей.

На приведенных выше фотографиях показаны два случая потери устойчивости трубопровода – в первом случае участки трубопровода слева и справа от компенсатора изгибаются разнонаправлено, во втором случае – изгиб участков происходит в одном направлении.

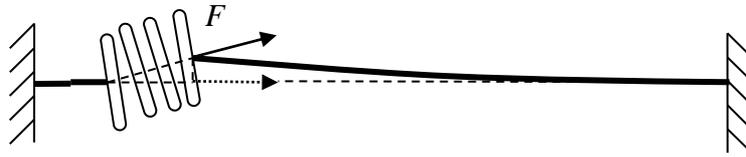


Рис.6 Изгиб консольно закрепленного трубопровода распорным усилием, отклоняющимся от оси трубопровода.

Система может находиться в равновесии в том случае, когда суммарная жесткость трубопровода на изгиб и жесткость компенсатора на сдвиг окажется больше, чем возникающее боковое отклоняющее усилие. При этом следует понимать, что при сдвиге патрубка компенсатора на определенную величину угол отклонения распорного усилия будет больше угла изгиба трубопровода пропорционально длинам компенсатора и трубопровода.

Учитывая, что на практике трубопровод всегда имеет изначальный эксцентриситет, необходимо задать некоторое граничное условие.

Известно [1], что прогиб консольно закрепленной балки при действии сосредоточенной силы определяется как:

$$b = \frac{N \cdot l^3}{3E \cdot J} \quad (2)$$

В тоже время боковая сила от изменения направления осевого усилия сильфона можно рассчитать по формуле:

$$N_{oc} = P_{oc} \cdot \sin(\arctan(b/a)) \quad (3)$$

Где, а – длина сильфона (без учета длины патрубков).

Жесткость сдвига определяется как:

$$F_{сдв} = \lambda_{сдв} \cdot b \quad (4)$$

Где, $\lambda_{сдв}$ – жесткость сильфона, на сдвиг.

Усилия изгиба трубопровода и усилия сдвига компенсатора линейно изменяются по величине сдвига, в тоже время значение боковой силы от осевого усилия компенсатора изменяется по синусоиде. Т.к. графики исходят из начала координат, то можно прийти к заключению - **если при малых отклонениях сумма жесткости изгиба трубопровода и сдвига компенсатора превышает боковую силу от осевого усилия компенсатора при его изгибе, то это соотношение сохраниться и при БОльших величинах отклонения.** Обобщая формулы (2),(3),(4) получаем критерий равновесия системы:

$$b \cdot \left(\frac{3EJ}{l^3} + \lambda_{сдв} \right) - P_{oc} \cdot \sin(\arctan(b/a)) \geq 0 \quad (5)$$

Пример:

На участке трубопровода диаметром 426 мм с толщиной стенки 8 мм и длиной 5 м, заземленного между двумя мертвыми опорами, рядом с одной из мертвых опор установлен простой сильфонный компенсатор без установки направляющих опор. Параметры компенсатора: эффективная площадь $S_{\text{эф}} = 1575 \text{ см}^2$, жесткость на сжатие $\lambda_{\text{ос}} = 579 \text{ кгс/см}^2$, жесткость на сдвиг $\lambda_{\text{сдв}} = 1100 \text{ кгс/см}$, длина сильфона – 430 мм. Внутреннее давление среды – 16 кгс/см², при действии температуры среды трубопровод сжимается на 10 мм. Модуль упругости стали при температуре среды $E = 192 \text{ ГПа}$, момент инерции сечения трубопровода $I = 22\,952,91 \text{ см}^4$.

Рассчитаем распорное усилие компенсатора:

$$P_{\text{расп}} = 1,25 P_y \cdot F_{\text{эф}} = 1,25 \cdot 16 \cdot 1575 = 31500 \text{ кгс}$$

Определим усилие от осевой жесткости компенсатора:

$$F_{\text{ос.ж}} = \lambda_{\text{ос}} \cdot \Delta = 579 \cdot 1 = 579 \text{ кгс}$$

Общее осевое усилие от сильфона:

$$P_{\text{ос}} = P_{\text{расп}} + F_{\text{ос.ж}} = 31500 + 579 = 32079 \text{ кгс}$$

Зададим величину изгиба $b = 10 \text{ мм}$ и проверим критерий равновесия:

$$b \cdot \left(\frac{3EJ}{l^3} + \lambda_{\text{сдв}} \right) - P_{\text{ос}} \cdot \sin(\arctan(b/a)) = 1 \cdot \left(\frac{3 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 2295291}{500^3} + 1100 \right) - 32079 \cdot \sin(\arctan(1/43)) = 935 \text{ кгс} > 0$$

*в формулу подставлены значения величины, приведенные к кгс и см.

Вывод – указанная система будет сохранять равновесие. Для указанного трубопровода критерий равновесия нарушится при длине трубопровода равной = 12,836 м.

В рассмотренном нами случае, при предельном заданном сдвиге – не более 10 мм, на конец трубопровода с сильфонным компенсатором может прилагаться внешнее боковое усилие всего 935 кгс, чего может оказаться недостаточно. При большей величине внешнего бокового усилия – сдвиг превысит заданный предел.

Если же компенсатор установлен посередине участка то длина изгибаемых участков трубопроводов составит половину длины начального участка, а суммарная величина сдвига компенсатора соответственно составит удвоенное значение прогибов трубопроводов.

Внимание! Выше приведен расчет равновесия системы в качестве обучающей информации! Следует понимать что, сдвиг компенсатора на значительную величину - многократно снижает ресурс компенсатора. Критерий равновесия должен превышать величину боковой силы от компенсатора при заданном сдвиге, с учетом возможных внешних боковых усилий. Т.е. критерий равновесия должен препятствовать возможным воздействиям и сдвигу компенсатора свыше допустимого значения. Сдвиг задается исходя из назначенной наработки сильфонного компенсатора.

Схема 2

На участке трубопровода установлен простой СК или СК с усиленным защитным кожухом, с каждой стороны от которого установлены две направляющие опоры. Первая на расстоянии – 2-4 Ду, вторая на расстоянии 14 Ду. Установка направляющих опор на таком малом расстоянии друг

от друга, позволяет определить сжимаемый конец трубопровода с сильфонным компенсатором как крепление, допускающее только продольное перемещение, и не допускающее поворота конца трубопровода. Направляющие опоры в этом случае должны воспринимать только боковое усилие. Вообще можно обойтись и одной направляющей опорой, но она в таком случае должна также допускать только продольное перемещение и не допускать поворота трубопровода. Строительство такой опоры существенно дороже и сложнее чем две опоры, установленные на расстоянии 10-12Ду друг от друга.

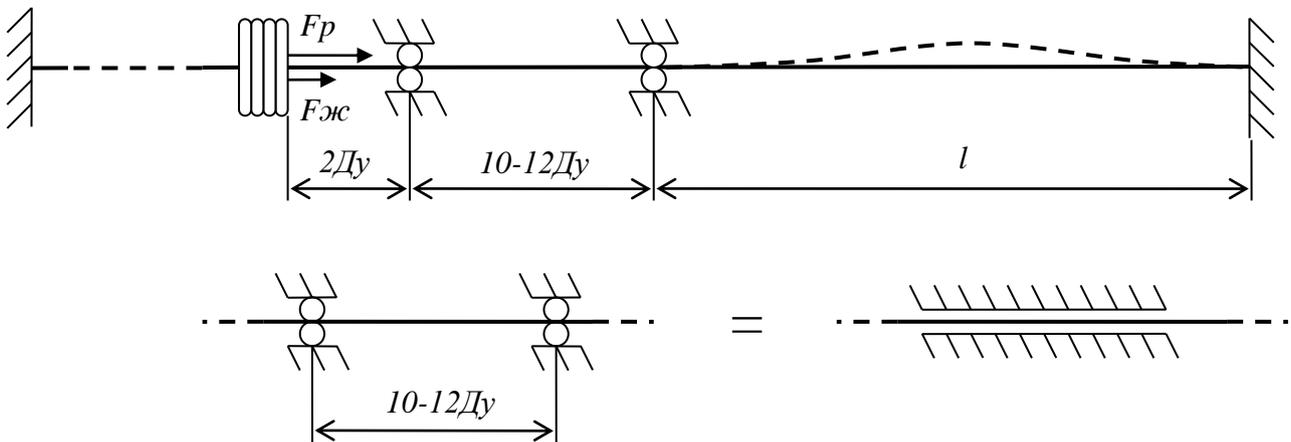


Рис 7. Расчетная схема 2. Простой сильфонный компенсатор с двумя парами направляющих опор. Вес трубопровода, скользящие опоры и силы трения не показаны.

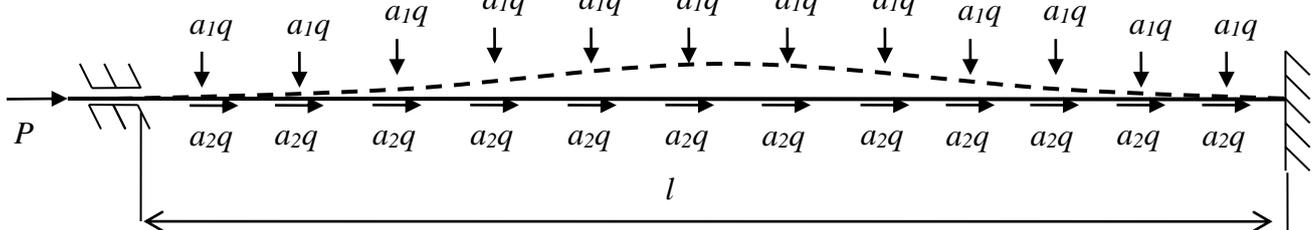


Рис. 8. Стабилизирующее действие поперечных сил трения и дополнительной осевой нагрузки от продольных сил трения

Рассмотрим изгибаемый участок трубопровода длиной l от мертвой опоры, до дальней от компенсатора направляющей опоры. На трубопровод действуют продольные силы трения с коэф. a_2 . Изгибу трубопровода препятствуют силы трения перпендикулярные оси трубопровода с коэф. a_1 – рис 8. Наиболее нагруженному состоянию соответствует состояние теплового расширения трубопровода, когда трубопровод «отталкивается» от мертвой опоры преодолевая продольную реакцию трения и сжимающее усилие компенсатора.

Дифференциальное уравнение изгиба для схемы 2 будет иметь вид:

$$EJ \frac{d^4 y}{dx^4} + (P + a_2 qx) \frac{d^2 y}{dx^2} = M + \frac{a_1 qlx}{2} - \frac{a_1 qx^2}{2} \quad (6)$$

Аналитическое решение линейного неоднородного дифференциального уравнения четвертого порядка с переменными коэффициентами слишком трудоемкий процесс, поэтому воспользуемся методом Галёркина.

Вводя в качестве аппроксимирующей кривой целую волну косинусоиды.

$$v(x) = -\frac{f}{2} \cos\left(\frac{2\pi x}{l}\right) \quad (7)$$

Где, f - амплитуда изгиба;

Придем к уравнению:

$$\int_0^l \left(EJ \frac{d^2 v}{dx^2} + (P + a_2 qx) \cdot v(x) - M - \frac{a_1 qlx}{2} + \frac{a_1 qx^2}{2} \right) \cos\left(\frac{2\pi x}{l}\right) dx = 0 \quad (8)$$

Интегрируя которое, находим значение прогиба;

$$f = \frac{2a_1 ql^4}{\pi^2 (8EJ\pi^2 - 2l^2 P - a_2 ql^3)} \quad (9)$$

Из уравнения (9) найдем критическое усилие;

$$P_{кр} = \frac{8EJf\pi^4 + 2a_1 ql^4 - a_2 ql^3 f\pi^2}{2\pi^2 l^2 f} \quad (10)$$

Функция $P_{кр}=w(l)$ в положительной области значений l имеет минимум. Приближенное положение, которого, можно определить по формуле:

$$l_k \approx \frac{\sqrt{2} \cdot \pi}{a_1 q} \sqrt[4]{EJa_1^3 q^3 f} \quad (11)$$

График зависимости $P_{кр}=w(l)$ имеет вид:

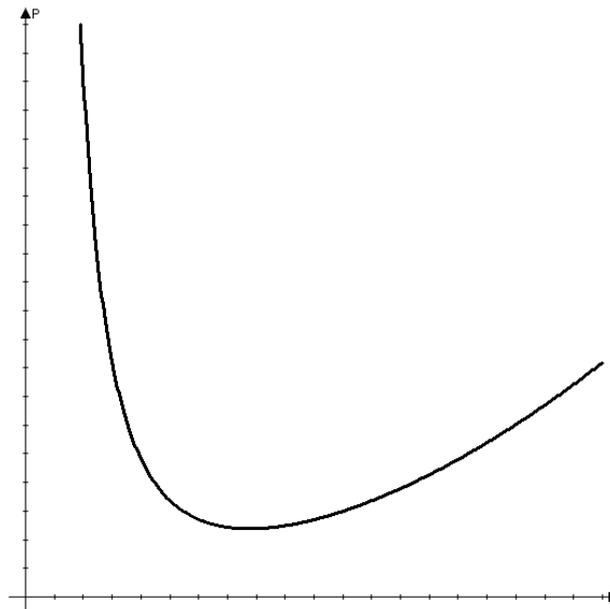


Рис. 9. Зависимость $P_{кр}$ от L

Критическая длина имеет следующий физический смысл: - если общая длина участка превышает критическую длину, то участок длиной l_k теряет устойчивость при минимальном значении сжимающего усилия независимо от остальной части участка – рис.10. Участок трубопровода не

теряющий устойчивость оказывает сжимающее воздействие от реакции трения на участок теряющий устойчивость. Очевидно, что неустойчивым будет участок, граничащий с мертвой опорой – как наиболее нагруженный.

Также следует обратить внимание на то, что заданный начальный изгиб трубопровода будет относиться в таком случае к критическому участку, а не к участку вообще.

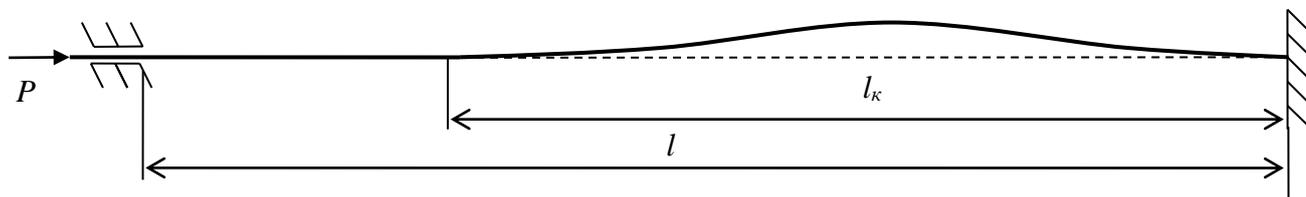


Рис 10. Потеря устойчивости трубопровода при длине, превышающей критическую. Продольные и боковые реакции трения условно не показаны.

Порядок расчета.

По формуле (11) рассчитывается критическая длина участка.

Если длина имеющегося участка меньше критической длины, то по формуле (10) определяется значения критического сжимающего усилия для имеющейся длины участка.

Если длина имеющегося участка больше критической длины, то по формуле (10) определяется значения минимального критического сжимающего усилия для участка с длиной l_k .

Рассчитываются значения сжимающего усилия от сильфонного компенсатора и силы трения от устойчивой части трубопровода (если длина трубопровода превышает критическую).

Сравниваются значения критического усилия и суммарного сжимающего усилия от сильфонного компенсатора и сил трения устойчивой части трубопровода.

Если действующее сжимающее усилие меньше критического значения – трубопровод устойчив, если сжимающее усилие больше критического значения – трубопровод неустойчив и требует стабилизации установкой дополнительных направляющих опор.

Схема 3

На участке между двумя неподвижными опорами установлено СКУ, направляющие опоры не установлены. Расчетная схема участка рассматривается как сжимаемый стержень один конец которого закреплен консольно, а второй допускает только продольное перемещение.

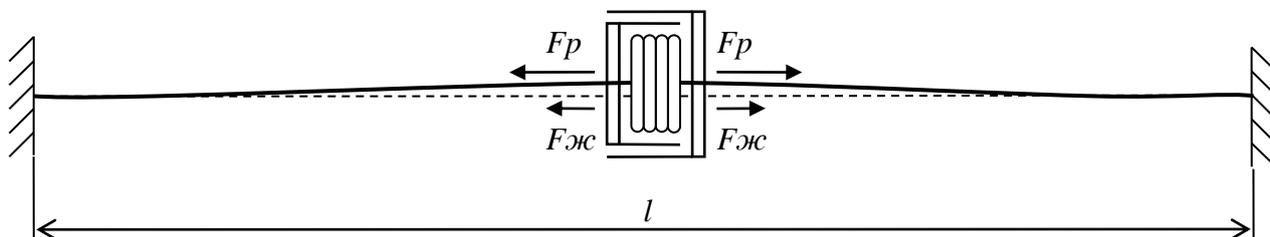


Рис. 11. Схема трубопровода с СКУ без направляющих опор. СКУ может быть установлен в любом месте трубопровода.

Боковых отклоняющих усилий СКУ на трубопровод не оказывает т.к. изгиб сильфона внутри устройства невозможен, равно как и изгиб самого устройства.

И схема и расчет - аналогичны расчету по схеме 2, с той лишь разницей, что за общую длину участка принимается теперь расстояние между мертвыми опорами, кроме того местоположение компенсатора также влияет на $R_{кр}$, т.к. при размещении СКУ посередине участка силы трения в продольном направлении для каждого из полуучастков уменьшаются в два раза. Для простоты, расчет ведут по наиболее нагруженному режиму – когда СКУ установлено у одной из мертвых опор.

ВНИМАНИЕ! По схеме 3 без направляющих опор могут устанавливаться только СКУ по ИЯНШ.300260.033ТУ ОАО «НПП «Компенсатор».

Расчет сжимающего усилия от сильфонного компенсатора.

Сжимающее усилие от сильфонного компенсатора, действующее на стенку трубопровода состоит из двух величин: - силы реакции сжатия компенсатора и разница распорного усилия.

Величина реакции сжатия определяется по стандартной формуле:

$$F_{ос.ж} = \lambda_{ос} \cdot \Delta \quad (12)$$

Разница распорного усилия определяется как усилие от внутреннего давления, действующая на разницу эффективной площади сильфона и внутреннего сечения трубопровода:

$$F_{pp} = 1,25 \cdot P_y \left(S_{эф} - \frac{\pi(D - 2s)^2}{4} \right) \quad (13)$$

$$N_{ск} = F_{ос.ж} + F_{pp} \quad (14)$$

Пример 2:

Трубопровод Д426х12, длиной 260 м, работает при температурах от -30°C до 95°C. Рабочее давление трубопровода – 25 кгс/см². Для компенсации температурных деформаций в середине участка установлен сильфонный компенсатор 2ОПКР-16-400-400 по ИЯНШ.300260.029ТУ. Рядом с СК установлено две пары направляющих опор – 1-ая на расстоянии 1м, 2-ая на расстоянии – 4,5м. Компенсирующая способность СК – 400мм (использует практически полностью), эффективная площадь – 1575 см², осевая жесткость – 351 кгс/см.

Рассчитаем сжимающее усилие от сильфонного компенсатора:

$$N_{ск} = 1,25 \cdot 25 \left(1575 - \pi \cdot (42,6 - 2 \cdot 1,2)^2 / 4 \right) + 351 \cdot 20 = 16576 \text{ кгс}$$

Параметры трубопровода:

$E_{95°C} = 195,2 \text{ ГПа} = 1,952 \cdot 10^6 \text{ кгс/см}^2$, $J = 33 \text{ 466 см}^2$, удельный вес трубопровода с теплоносителем и изоляцией – 300 кгс/м = 3 кгс/см. Коэф. трения в продольном направлении $a_2 = 0,3$, коэф. трения в поперечном направлении $a_1 = 0,8 \times 0,3 = 0,24$.

Зададим величину максимального начального изгиба трубопровода в 1м (100см) и рассчитаем критическую длину трубопровода:

$$l_k \approx \frac{\sqrt{2} \cdot \pi}{a_1 q} \sqrt[4]{E J a_1^3 q^3 f} = \frac{\sqrt{2} \cdot \pi}{0,24 \cdot 3} \sqrt[4]{1,952 \cdot 10^6 \cdot 33466 \cdot 0,24^3 \cdot 3^3 \cdot 100} \approx 771 \text{ см} = 77 \text{ м} \leq \frac{260}{2} - 5$$

Т.к. $l_k < l$ следовательно расчет критического сжимающего усилия необходимо вести для длины l_k .

$$P_{кр} = \frac{8EJf\pi^4 + 2a_1ql^4 - a_2ql^3f\pi^2}{2\pi^2l^2f} = \frac{8 \cdot 1,952 \cdot 10^6 \cdot 33466 \cdot 100 \cdot \pi^4 + 2 \cdot 0,24 \cdot 3 \cdot 7711^4 - 0,3 \cdot 3 \cdot 7711^3 \cdot 100 \cdot \pi^2}{2\pi^2 \cdot 7711^2 \cdot 100}$$

$$= 83280 \text{ кгс} = 83,3 \text{ тнс}$$

Определим сжимающие силы трения устойчивой части трубопровода:

$$F_{тр} = (l-l_k)qa_2 = (125 - 77) \cdot 300 \cdot 0,3 = 4320 \text{ кгс}$$

Проверяем устойчивость:

$$F_{тр} + N_{сж} = 4320 + 16576 = 20896 < 83280$$

Результат – трубопровод устойчив, установка дополнительных направляющих опор не требуется.

Пример 3:

Рассмотрим трубопровод из примера 2, но вместо СК установлено СКУ.М-25-400-400 рядом с одной из мертвых опор. Направляющих опор не установлено вообще.

Также как и в предыдущем случае получаем $l_k=77,1\text{м}$, $P_k=83280$ кг. Отличие в данном случае будет в длине устойчивой части трубопровода, теперь это – $260-77=183\text{м}$. Рассчитаем силы трения от этого участка:

$$F_{тр} = (l-l_k)qa_2 = (260 - 77) \cdot 300 \cdot 0,3 = 16470 \text{ кгс}$$

Проверим устойчивость:

$$F_{тр} + N_{сж} = 16470 + 16576 = 33046 < 83280$$

Трубопровод устойчив и не требует установки направляющих опор. Вообще авторам для случаев применения СКУ по схеме 3 при эксплуатации в реальной тепловой сети не удалось получить результатов, при которых трубопровод потерял бы устойчивость.

Внесем изменения в пример 2 – зададим начальный изгиб трубопровода в $7\text{м} = 700\text{см}$. Получим критическую длину участка – $131,19\text{м}$, критическое усилие = $27\,017\text{кгс}$. Рассчитаем силы трения для устойчивой части:

$$F_{тр} = (l-l_k)qa_2 = (260 - 131) \cdot 300 \cdot 0,3 = 11610 \text{ кгс}$$

Проверим устойчивость трубопровода:

$$F_{тр} + N_{сж} = 11610 + 16576 = 28186 > 27017$$

Результат: при заданном изгибе трубопровода в 7м рассмотренный трубопровод не устойчив.

Учет парусности.

При надземной прокладке следует по известным методикам определить отклоняющее удельное усилие от ветра и отразить его в коэф. a_1 .

Пример 4:

На трубопровод, рассмотренный в примере 2, проложенный надземно, действует боковое отклоняющее усилие от ветра - 10 кгс/м = 0,1 кгс/см. Определим коэф. a_1 с поправкой.

$$a'_1 = \frac{q \cdot a_1 - q_{ветр}}{a_1} = \frac{3 \cdot 0,24 - 0,1}{3} = 0,20667 \quad (15)$$

Учет значительного уклона трубопровода

Если участок трубопровода расположен со значительным уклоном то компенсатор необходимо располагать в нижней части трубопровода. Если же по каким-либо причинам, расположить компенсатор в нижней части трубопровода не удастся необходимо рассчитать коэф. a_2 с поправкой.

$$a'_2 = \frac{q \cdot a_2 + q \cdot \sin \alpha}{a_2} \quad (16)$$

Где α – угол наклона трубопровода.

Влияние несоосности направляющих опор, требования к направляющим опорам, способы стабилизации трубопровода, а также отличия между СКУ и СК с усиленным защитным кожухом авторы рассмотрят в следующем номере.

Использование материалов статьи, результатов и способов расчетов в нормативно-технических документах, технических условиях и т.п. допускается только с письменного согласия авторского коллектива и с обязательной ссылкой на авторов.

Список использованной литературы:

1. Фесик С.П. Справочник по сопротивлению материалов.-2-е изд., перераб. и доп.-К.:Будівельник, 1982г.
2. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. – 2-е изд., перераб. и доп.-М.:Наука, 1967г.
3. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теория упругости. -4-е изд., перераб. и доп.-М.:Наука, 1987г.
4. Баженов В.А., Дашенко А.Ф., Орбей В.Ф., Сурьянинов Н.Г. Численные методы в механике, 2004г.
5. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций.-К.:Факт, 2005г.
6. Биргер И.А., Пановко Я.Г. Прочность.Устойчивость.Колебания-т1.-М.: Машиностроение, 1968г.

Журнал «Новости теплоснабжения», № 07 (131), июль 2011, www.ntsni.ru