

УДК 621.643

**НАПРЯЖЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ КОМПЕНСАЦИИ
ТЕПЛОВЫХ УДЛИНЕНИЙ В ТРУБОПРОВОДАХ**

©Оболенская Т. А., Писарцов А. С.

Украинская инженерно-педагогическая академия

В статье рассматривается расчет напряжений от самокомпенсации теплового расширения. Исследуется влияние монтажного натяга для снижения величины пластических деформаций, связанных с релаксацией.

Ключевые слова: трубопровод, монтажный натяг, паропровод, температурные удлинения.

Оболенська Т. О., Писарцов О. С. «Напруження, що виникають при компенсації теплових подовжень в трубопроводах».

У статті розглядається розрахунок напружень від самокомпенсації теплового розширення. Досліджується вплив монтажного натягу для зниження величини пластичних деформацій, пов'язаних з релаксацією.

Ключові слова: трубопровід, монтажний натяг, паропровід, температурні подовження.

Obolenskaya T. A., Pisartsov A. S. “Tensions that during compensation of thermal extension in pipelines are appearing”.

In the article the calculation of tensions is examined from selfcompansation of thermal expansion. Influence of assembling draw on for the decline of size of flowages, related to relaxation.

Key words: pipeline, assembling draw on, steam pipeline, temperature lengthening.

1. Актуальность проблемы

За последнее время теплоэнергетика сделала серьезных шаг вперед не только в наращивании общей мощности агрегатов, но и в совершенствовании термодинамического цикла – применения промежуточного перегрева пара и повышения начальных параметров цикла. Это, в свою очередь сделало необходимым уточнение методов расчета на прочность труб и деталей трубопроводов.

2. Постановка задачи

Напряжения, возникающие при компенсации тепловых удлинений, – температурного происхождения; являясь следствием деформаций ограниченной величины, не могут вызывать разрушения трубопровода, не имеющего резких местных ослаблений, при небольшом числе повторных нагружений (пусков и отключений) трубопровода. В трубопроводе находящемся под давлением, изгибающие и крутящие моменты достаточной величины могут вызывать пластический изгиб, однако при этом пластические деформации в

окружном и радиальном направлениях (увеличение диаметра, утончение стенки) остаются незначительными и не сопровождаются заметным снижением прочности трубы по отношению к внутреннему давлению.

3. Основной материал

Известно, что фактически изгибающие и крутящие моменты могут заметно превышать расчётные в результате неблагоприятного сочетания допусков по толщине стенки и диаметру. Отношение максимального момента инерции поперечного сечения трубы к минимальному, при допуске $\pm 1,25\%$ по толщине стенки и $\pm 1,25\%$ по диаметру, достигает 1,39. Следовательно, если кусок трубы в сечении наибольшего изгибающего момента имеет наибольшие отрицательные допуски, а весь остальной трубопровод выполнен из труб с наибольшими положительными допусками, то фактические напряжения самокомпенсации могут превысить расчетные на 20-30%. В этом случае, в наиболее нагруженном сечении возникает шарнир пластического изгиба и трубопровод получит саморастяжку, но никаких повреждений в трубопроводе не возникнет [1]. Способность стальных трубопроводов к пластическим деформациям и позволяет при расчетах на самокомпенсацию ограничиться минимальными коэффициентами запаса.

Поверочный расчёт напряжений от самокомпенсации теплового расширения выполняется следующим образом. Эквивалентное напряжение от нагрузок, вызываемых температурным удлинением трубопровода, определяется по формуле:

$$\sigma_s^{ck} = \sqrt{(\sigma_p^{ck} + 0,8\sigma_u^{ck})^2 + 3\tau^2}, \quad \text{МПа} \quad (1)$$

в которой $\sigma_p^{ck} = \frac{Q^{ck}}{f}$ – дополнительное напряжение растяжения или сжатия, создаваемое продольным усилием Q^{ck} (реакции неподвижных опор, силы трения); $\sigma_u^{ck} = \frac{M_u^{ck}}{\phi W}$ – напряжение от изгибающего момента M_u^{ck} , возникающего при самокомпенсации; $\tau = \frac{M_k^{ck}}{2W}$ – напряжение от крутящего момента M_k^{ck} , возникающего при самокомпенсации; ϕ – коэффициент прочности поперечного сварного шва; принимаемый равным для труб из перлитной стали катаных $\phi = 0,8$, ковано-сверленных $\phi = 0,9$, а для труб из аустенитной или высокохромистой стали катаных $\phi = 0,6$ и ковано-сверленных $\phi = 0,7$.

Отметим, что в выражение для определения напряжений изгиба не введен коэффициент интенсификации напряжений для кривых участков труб. Такой коэффициент необходимо было бы ввести, если бы рассматривались напряжения в пределах упругих деформаций, однако в качестве предельного рассматривается пластический изгиб, при котором напряжения изгиба по всему сечению трубы достигают предельных (предела текучести) и выравниваются.

Величина вычисленного по формуле (1) эквивалентного напряжения от самокомпенсации температурного удлинения должна удовлетворять условию:

$$\sigma_3^{ck} \leq 0,87\sigma_{дон}\sqrt{2-\left(\frac{\sigma_{np}}{\sigma_{дон}}\right)^2} - \sigma_3^{en} = [\sigma^{cd}] - \sigma_3^{en} \quad (2)$$

где σ_{np} – приведенное напряжение от внутреннего давления;

σ_3^{en} – эквивалентное напряжение от дополнительных внешних нагрузок.

В формуле (2) величина

$$[\sigma^{cd}] = 0,87\sigma_{дон}\sqrt{2-\left(\frac{\sigma_{np}}{\sigma_{дон}}\right)^2}, \text{ МПа} \quad (3)$$

представляет допустимое суммарное эквивалентное напряжение от дополнительных внешних нагрузок и нагрузок, вызываемых температурным удлинением трубопровода.

Выражение (2) можно представить в виде неравенства

$$\sigma_3^{ck} + \sigma_3^{en} \leq [\sigma^{cd}] \quad (4)$$

левая часть которого представляет сумму эквивалентных напряжений от самокомпенсации и внешних дополнительных нагрузок, возникающих в одном и том же сечении трубопровода[4].

Однако неравенство (4) вполне справедливо только в единственном, сравнительно редком случае, когда плоский трубопровод располагается в вертикальной плоскости, причем изгибающие моменты от весовых нагрузок и самокомпенсации совпадают по направлению (одного знака).

Во всех пространственных конфигурациях трубопроводов и в плоских горизонтальных участках результирующие изгибающие моменты от самокомпенсации не лежат в плоскости действия моментов от весовых нагрузок, а следовательно, наибольшие напряжения σ_3^{ck} и σ_3^{en} возникают в различных точках рассматриваемого сечения и не могут суммироваться (или вычитаться).

Для правильного решения необходимо применить геометрическое сложение моментов, вызываемых температурными удлинениями трубопровода, и моментов от дополнительных внешних нагрузок и определить суммарный изгибающий момент M_u^{cd} и суммарный крутящий момент M_k^{cd} . Затем вычисляются суммарные напряжения от совместного действия всех дополнительных нагрузок: изгиба $\sigma_u^{cd} = M_u^{cd} / \varphi W$, кручения $\tau^{cd} = M_k^{cd} / 2W$ и растяжения $\sigma_p^{cd} = Q^{cd} / f$. После этого определяется эквивалентное дополнительное суммарное напряжение:

$$\sigma_3^{cd} = \sqrt{(\sigma_p^{cd} + 0,8\sigma_u^{cd})^2 + 3(\tau^{cd})^2}, \text{ МПа} \quad (5)$$

которое должно удовлетворять условию

$$\sigma_3^{cd} \leq [\sigma^{cd}] \quad (6)$$

где $[\sigma^{cd}]$ – допустимая величина напряжения, определяется из уравнения (3).

Насколько существенна разница в определении допустимой величины напряжений от самокомпенсации температурного удлинения по формулам (2) и (5), можно выяснить,

рассмотрев плоский горизонтальный участок, у которого напряжение изгиба от весовой нагрузки составляет $0,55[\sigma^{co}]$, что соответствует отношению $\sigma_{np} / \sigma_{дон} = 0,9$ [2].

При определении допускаемого напряжения самокомпенсации по формуле (2) оно должно быть ограничено величиной $0,45[\sigma^{co}]$. При геометрическом же сложении моментов величина эквивалентного напряжения самокомпенсации может быть увеличена до $\sqrt{1-0,55^2}[\sigma^{co}] = 0,83[\sigma^{co}]$, или на 85 %.

При определении изгибающих и крутящих моментов от дополнительных нагрузок для рабочего состояния все деформации предполагаются упругими и релаксация напряжений отсутствующей.

Наряду с расчетом суммарных дополнительных напряжений для рабочего состояния трубопроводов необходим поверочный их расчет и для холодного состояния. Такой расчет предлагается выполнять с учетом: а) пробного давления при гидравлическом испытании трубопровода; б) полной саморастяжки трубопровода вследствие релаксации температурных напряжений. Изгибающие моменты от собственного веса трубопровода также должны определяться для условий гидравлического испытания, т.е. для паропроводов с учетом веса воды в трубопроводе и установки на подвесках ограничителей сжатия пружин, а для трубопроводов горячей воды – с учетом изменения натяга пружинных креплений вследствие вертикальных смещений оси трубопровода.

Напряжения от собственного веса, возникающие в рабочем состоянии трубопровода, также частично релаксируют, и это вызывает снижение изгибающих моментов над опорами и увеличение их в пролетах. Для равнопролетной конструкции снижение моментов над опорой в результате релаксации составляет 25%. В связи с этим изгибающие моменты над опорами от весовой нагрузки следует, строго говоря, вычислять по формуле:

$$M_u^{вн} = M_{u.x.}^{вн} - 0,25M_{u.г.}^{вн},$$

где $M_{u.x.}^{вн}$ – изгибающий момент в холодном состоянии при гидравлическом испытании трубопровода; $M_{u.г.}^{вн}$ – изгибающий момент в рабочем состоянии трубопровода, в начальный период его работы (до релаксации напряжений).

Для стационарных трубопроводов, как правило, применяют умеренные пролеты между креплениями, и напряжения от собственного веса получаются в трубопроводах незначительными, до 20 МПа; в этих случаях поправкой на релаксацию весовых напряжений можно пренебречь.

Допустимая величина суммарного напряжения от самокомпенсации и дополнительных внешних нагрузок $[\sigma^{co}]$ заметно снижается с повышением температуры, примерно от 120 МПа при 200 °С до 55 МПа при 570 °С (для применяемых при этих температурах стали марок 20 и 12 ХМФ и приведенных напряжениях от внутреннего давления, близких к допускаемым) [5]. Если же учесть напряжения от весовой нагрузки, то на долю допускаемых напряжений самокомпенсации остается примерно 100 МПа при 200 °С и около 30 МПа при 570 °С. В связи с понижением допускаемых напряжений

самокомпенсации при одновременном увеличении тепловых удлинений иногда возникают при проектировании высокотемпературных трубопроводов затруднения с обеспечением необходимой самокомпенсации. Это затруднения могут быть преодолены разными способами: 1) уничтожением излишних промежуточных неподвижных креплений; 2) уменьшением в наиболее напряженном сечении напряжений от весовой нагрузки путем установки дополнительного крепления, что дает возможность повысить напряжения самокомпенсации; 3) монтажным натягом трубопроводов с целью снижения напряжений самокомпенсации в горячем трубопроводе.

Известно, что монтажный натяг является эффективным средством увеличения компенсирующей способности трубопроводов при высоких температурах [3]. Монтажный натяг трубопроводов, работающих при невысоких температурах (трубопроводы питательной воды), не дает увеличения компенсирующей способности, поскольку напряжение $[\sigma^{cd}]$ в холодном состоянии с учетом повышения давления при гидравлическом испытании меньше, чем в горячем состоянии.

В некоторых проектных организациях отказываются от применения предварительных натягов трубопроводов из опасений, что при монтаже трубопроводов предусмотренные монтажные натяги выполнены, не будут. До некоторой степени это нашло отражение в осторожной рекомендации учитывать в расчетах монтажный натяг в размере $\frac{2}{3}$ от заданного проектом. Однако все такого рода опасения не являются обоснованными, так как в практике не известны случаи повреждений паропроводов в начальный период эксплуатации из-за невыполнения, требуемого проектом монтажного натяга; в последующий же период работы происходит саморастяжка паропровода в результате релаксации температурных напряжений.

Если отказ от монтажной растяжки не влечет за собой необходимости искусственного увеличения гибкости трубопровода или увеличения вылетов компенсаторов, то это не вызывает особых возражений (хотя и в этом случае применение монтажного натяга полезно с точки зрения снижения общего размера пластических деформаций, связанных с релаксацией). Однако во многих случаях отказ от предварительного монтажного натяга требует удлинения и усложнения трассы паропроводов, что приводит не только к неоправданным дополнительным капитальным затратам, но и к дополнительным эксплуатационным издержкам (росту амортизационных отчислений, затрат на ремонт, повышению потерь давления в трубопроводе, увеличению потерь тепла через теплоизоляцию).

Всякое удлинение и усложнение трасс паропроводов, принимаемое в проекте ради отказа от монтажного холодного натяга, следует рассматривать как технически и экономически неправильное решение проектной задачи. Следует отметить, что в американской практике ограничивается только размах напряжений самокомпенсации, величина же напряжений самокомпенсации в работающих трубопроводах нормами не лимитируется, иначе говоря, допускается саморастяжка трубопроводов.

Выводы

1. Для компенсации температурных напряжений необходим монтажный натяг.
2. При отказе от предварительного монтажного натяга требуется удлинение и усложнение трассы паропроводов.
3. Всякое удлинение и усложнение трасс паропроводов, принимаемое в проекте, ради отказа от монтажного холодного натяга, следует рассматривать как технически и экономически неправильное решение проектной задачи.

Список использованных источников:

1. Тавастшерна Р. И. Изготовление и монтаж технологических трубопроводов : учеб. пособие для проф.-техн. училищ и индивидуального и бригадного обучения рабочих на производстве / Р. И. Тавастшерна. – М. : Высш. шк., 1967. – 287 с.
2. Персион А. А. Монтаж трубопроводов: справочник рабочего / А. А. Персион, К. А. Гарус. – К. : Будівельник, 1987. – 207 с.
3. Тарлинский В. Д. Трубопроводы – инструмент геополитики / В. Д. Тарлинский. – М. : Изд-во МИК, 2009 – 381 с.
4. Сварочно-монтажные работы в трубопроводном строительстве: учеб. пособие для вузов /А. Ф. Суворов А.Ф., Г. Г. Васильев, Ю. А. Горяинов [и др.]. – М. : Звезда, 2006. – 240 с: ил.
5. Дрейцер Г. А. Расчет разогрева и охлаждения трубопроводов / Г. А. Дрейцер, В. А. Кузьминов. – М. : Машиностроение, 1977. – 128 с.

Стаття надійшла до редакції 17 квітня 2014 р.