

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСИЛИЙ В ТРУБОПРОВОДНЫХ СИСТЕМАХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Промышленные трубопроводные системы, соединяющие между собой агрегаты единого технологического процесса, расположенные в одном или разных цехах, а в ряде случаев – на различных предприятиях, являются неотъемлемой частью любого производства.

На современном металлургическом предприятии по таким системам транспортируется значительное количество газа, воздуха и т.п., общий объем которых по отдельным из них достигает 600 тыс.м<sup>3</sup>/ч и более [1].

Учитывая столь значительные объемы транспортировки газов, прямую взаимосвязь трубопроводных систем с технологическим процессом и технический прогресс различных отраслей промышленности, возникают новые сложные задачи в области проектирования промышленных трубопроводов. Увеличение единичной мощности и производительности агрегатов, повышение температуры и давления рабочей среды, усложнение схем взаимодействия между агрегатами – все это ставит трубопроводы в более тяжелые условия нагружения и эксплуатации, повышает их ответственность и капитальные затраты на строительство.

Существенной особенностью трубопроводов, обеспечивающих работу производств и предприятий, является отсутствие возможности их функционального резервирования. Организация резервной сети транспортировки газа представляет собой сложную, практически неосуществимую задачу, не нашедшую своей реализации. Если внутрицеховые трубопроводы могут ремонтироваться одновременно с цеховыми агрегатами при их остановке, то межцеховые общезаводские трубопроводы эксплуатируются без замены 30–50 и более лет.

Эти обстоятельства предъявляют к трубопроводным системам высокие требования по их надежности и долговечности.

Основная особенность трубопроводных систем состоит в том, что их эксплуатация происходит при изменяющейся повышенной температуре оболочки трубопроводов, что вызывает необходимость дополнительного анализа напряженного состояния конструкций, входящих в систему.



**А.Е. Любин**  
генеральный директор корпорации  
«Промстальконструкция», к.т.н.,  
г. Днепропетровск

Как известно, при нагреве длина трубопроводов увеличивается, а при остывании уменьшается на 1,2–1,4 мм на метр длины на каждые 100 °С изменения температуры. В то же время, компенсация температурного удлинения трубопроводов за счет упругого сжатия возможна лишь при изменении температуры в пределах 30 °С.

Поэтому для протяженных в различных направлениях трубопроводных систем наиболее серьезным воздействием, определяющим их компоновку и уровень напряженного состояния, является температурное поле оболочки трубопровода, как следствие воздействия температуры, транспортируемой по трубопроводу среды, и окружающего воздуха.

Поскольку трубопроводные системы, как правило, представляют собой статически неопределимые схемы, то при изменении температуры одного или нескольких элементов, в данном случае оболочки трубопровода, в связи со стеснением возможности изменений в размерах, имеющих место при изменении температурного поля, за счет появления температурных перемещений системы, во всех ее элементах возникают дополнительные т.н. *температурные усилия* и соответствующие им температурные напряжения.

Усилия возникают в различных направлениях, но, в основном, вдоль оси трубопровода и передаются на опорные конструкции и примыкающее оборудование. Их величина зависит от жесткости системы, расстановки опор, их типов и способа опирания на них трубопровода – опорной части. Эти усилия в большинстве случаев являются критериальными по величине характеристиками оптимальности конструктивной схемы и определяющими в общих нагруз-

ках на опоры и их фундаменты. Их величина является настолько серьезным фактором, что зачастую необходимо принимать специальные меры конструктивного и технологического характера для уменьшения эффекта проявления температурного воздействия и, соответственно, снижения уровня температурных усилий.

Поэтому, одно из главных требований, предъявляемых к трубопроводным системам, состоит в их ограничении и оптимизации. В рационально запроектированной системе температурные усилия, передаваемые на примыкающее оборудование, не должны превосходить значений, определяемых его техническими данными, а усилия, передаваемые на опоры и их фундаменты, значений возможности их рационального выполнения.

Основным способом снижения температурных усилий в трубопроводных системах является повышение их общей деформативности за счет внутреннего поглощения перемещений, что приводит к уменьшению величин усилий, передаваемых на оборудование и опорные конструкции.

Трубопроводная система komponується из отдельных температурных блоков, в которых способы понижения их жесткости и, соответственно, повышения деформативности за счет «гашения» температурных перемещений ведущего трубопровода могут быть различными, и реализация их возможна двумя основными способами [2]:

- установкой специальных устройств – компенсаторов, служащих для «поглощения» перемещений за счет своей деформативности;
- понижением общей жесткости системы за счет выбора оптимальной конфигурации трассы, оптимизации опорных закреплений, использования деформативности колен при их изгибе и «овализации» в местах изменения направления трубопровода и т.п.

В зависимости от выбранной схемы, а также от количества и мест установки и типов компенсаторов, трубопроводные системы по степени жесткости можно классифицировать следующим образом:

- *гибкие* – системы с низкой жесткостью, способные самостоятельно компенсировать температурные перемещения за счет собственных деформаций изгиба, пониженной жесткости колен, вызванной их «овализацией»

и пр. Температурные усилия здесь могут быть также уменьшены за счет рациональной расстановки опор, снижения их жесткости, сокращения связевых ограничений на концевых и промежуточных опорах.

Такие системы, как правило, не требуют установки компенсаторов. Однако, при необходимости, для снижения жесткости в них также могут дополнительно устанавливаться компенсаторы;

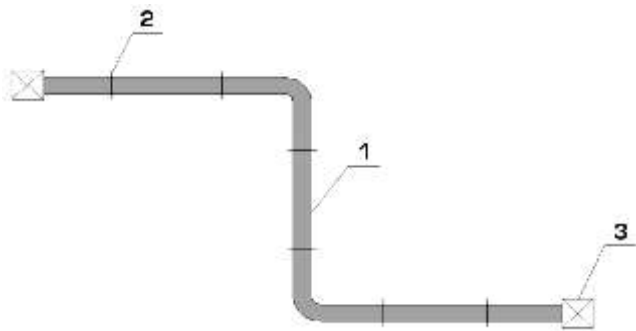
- *продольно-подвижные* – системы, в которых температурные удлинения полностью воспринимаются и «гасятся» компенсаторами, способными изменять длину по осевому направлению перемещения трубопровода. Неподвижные опоры в таких системах и примыкающее оборудование воспринимают лишь усилия температурного распора компенсатора и неуравновешенное давление на последний диск волны;
- *шарнирные* – системы, в которых уменьшение температурных напряжений достигается установкой компенсаторов, работающих на сдвиг или изгиб.

Исходя из этой классификации, можно выделить три основных типа температурных блоков [3]:

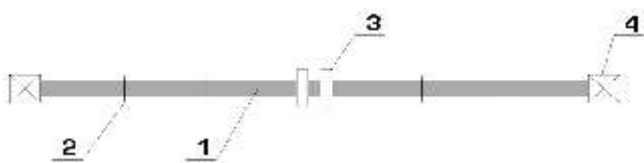
- блоки с изменениями направления трассы – компенсирующими перемещения за счет общей гибкости (деформирования примыкающих участков трассы) и изгиба колен (рис. 1);
- прямолинейные блоки с компенсаторами – продольно-подвижные (рис. 2);
- комбинированные, когда для снижения усилий от температурных перемещений в изгибаемом блоке дополнительно устанавливаются компенсаторы, как правило, сдвиговые (рис. 3).

Температурные блоки с изменениями направления трассы, компенсирующими температурные перемещения за счет пониженной их жесткости, связанной с «овализацией» колен, упругих деформаций и естественной гибкости, называются самокомпенсирующими. Они полностью или в большой степени компенсируют температурные перемещения, не передавая при этом значительных усилий на опоры и оборудование.

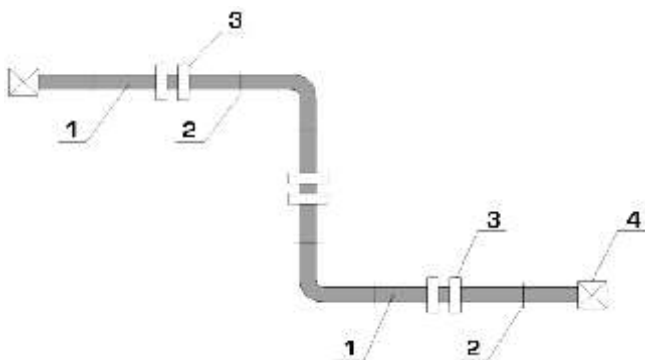
Поэтому, с точки зрения минимизации усилий на опоры и на примыкающее оборудование наиболее экономично создавать самокомпенсирующие температурные блоки.


**Рис. 1. Самокомпенсирющий блок:**

1 – трубопровод; 2, 3 – плоская и неподвижная опоры соответственно


**Рис. 2. Прямолинейный продольно-подвижный блок:**

1 – трубопровод; 2 – плоская опора; 3 – осевой компенсатор; 4 – неподвижная опора


**Рис. 3. Комбинированный блок:**

1 – трубопровод; 2 – плоская опора; 3 – сдвиговой компенсатор; 4 – неподвижная опора

Однако при проектировании систем с большим количеством технологического оборудования создать полностью самокомпенсирующую систему сложно, так как такая система требует значительного пространства на генеральном плане предприятия для прокладки трубопроводов и увеличивает их общую протяженность. К подобным системам прежде всего относятся внутрицеховые системы, соединяющие технологические агрегаты, а также системы, прокладываемые между цехами по заводским территориям при неблагоприятных условиях генерального плана.

Наглядным примером могут служить трубопроводные системы доменного цеха. Насыщенность крупными технологическими агрегатами, большим количеством оборудования и

стесненность территории практически не дают возможности создать здесь регулярную систему удовлетворительной гибкости. В связи с этим для ее повышения жесткость системы искусственно понижают введением в нее компенсаторов.

Обычно компенсаторы устанавливают таким образом, чтобы они воспринимали деформации строго определенного характера. Так, сжатие или растяжение трубопровода вдоль продольной оси соответствует работе продольно-подвижных компенсаторов осевого типа, смещение продольных осей его концов с сохранением параллельности между их плоскостями – работе компенсаторов сдвигового типа, а изгиб компенсатора с образованием угла между плоскостями его концов дает конструктивное исполнение компенсаторов шарнирного типа. В этих случаях компенсатор понижает жесткость системы в необходимом направлении, сохраняя при этом ее общую жесткость в других направлениях.

Из трубопроводных систем, работающих при низком давлении, наиболее распространены гибкие и продольно-подвижные. Близко расположенное оборудование и возможность применения простых конструкций компенсаторов низкого давления создают благоприятные условия для их применения. Продольно-подвижные системы широко используются также при реконструкции и удлинении трубопроводных систем.

В надземных трубопроводных системах применяются следующие типы компенсаторов:

- образуемые путем естественных или искусственных поворотов трассы – П, Z и Г-образные;
- волновые – осевого и сдвигового перемещения (линзовые, дисковые и сильфонные);
- сальниковые – осевого перемещения;
- шарнирные – сдвигового перемещения;
- ленточные неметаллические.

Компенсаторы, образуемые путем изменения направления участков трассы, снижают жесткость системы и хорошо компенсируют температурные удлинения за счет «овализации» и деформирования колен в углах поворотов трубопроводов [4]. Удачно выбранное изменение конфигурации линии трубопровода часто оказывается весьма эффективным средством повышения его компенсирующей способности.

Такой способ компенсации можно использовать для всех систем, исключая системы с футерованными трубопроводами, т.к. футеровка и расположенные здесь ребра для ее удержания препятствуют деформированию («овализации») колен, не допуская тем самым понижения жесткости.

Недостатки этого способа отмечены выше, а к положительным свойствам можно отнести отсутствие ограничений по давлению транспортируемой среды, связанных с прочностью компенсаторов.

*Волновые* компенсаторы осевого перемещения представляют собой гибкие вставки, состоящие из волн в виде сварных дисков, а сдвигового перемещения – в виде гнутых линз, вставляемых в трубопроводы.

Волновые осевые компенсаторы служат для восприятия линейных продольных перемещений при температурном расширении трубопровода, когда деформирование компенсатора происходит в результате сжатия (растяжения) волн, а волновые сдвиговые компенсаторы – для восприятия угловых перемещений, реализуемых в результате изгиба волн. Компенсирующая способность волновых осевых компенсаторов определяется максимально возможным изменением их длины, а сдвиговых – максимальной величиной угла раскрытия линзы по условию прочности.

Волны в виде сварных дисков применяются только для компенсаторов осевого перемещения, а в виде гнутых линз, допускающих угловые повороты, могут применяться также для сдвиговых и шарнирных компенсаторов.

Возможность использования компенсаторов из сварных дисков ограничивается прочностью самих дисков, работающих как плоские неподкрепленные пластины. Поэтому их применение возможно только при давлении внутренней среды не более 30 кПа. Простота конструкции, возможность изготовления на заводах металлоконструкций без специальной механической обработки повышенной точности – все это способствует их широкому распространению с возможностью поставки на монтаж совместно с трубопроводами.

В трубопроводах, работающих под давлением более 30 кПа, применяют компенсаторы с волнами в виде гнутых элементов. Такие компенсаторы могут изготавливаться на специали-

зированных предприятиях, например, в виде полулинз, соединяемых сваркой в вершинах и впадинах волны в полные линзы.

Во избежание чрезмерного увеличения силы упругого сопротивления осевых компенсаторов возможно применение многоволновых компенсаторов, компенсирующая способность которых определяется суммарной компенсирующей способностью каждой волны. В связи с их небольшой поперечной жесткостью при работе на изгиб, число волн не рекомендуется принимать больше трех–четырёх.

Экономическая целесообразность и достигаемый при этом эффект наведены в таблице.

Количество компенсаторов и опор на 1000 м длины системы

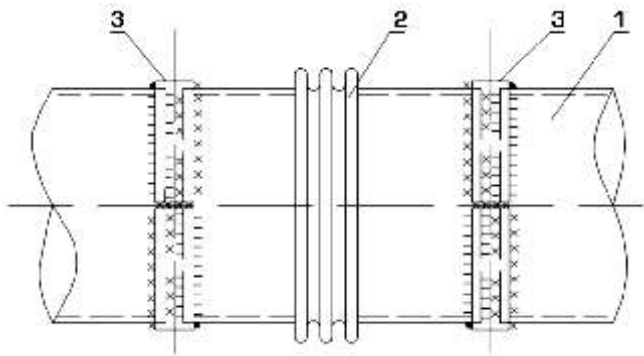
Тип компенсатора	Количество компенсаторов	Типы опор, шт	
		неподвижные	поддерживающие компенсаторы
Одноволновый	33	33	66
Двухволновый	17	17	34
Трехволновый	11	11	22

Волновые компенсаторы применяются, как правило, только на трубопроводах, транспортирующих продукт, не вызывающий отложения пыли, т.к. на запыленных трубопроводах волны, заполняясь пылью, выходят из строя. При необходимости волновые компенсаторы могут иметь дополнительные элементы – затяжки, воспринимающие неуравновешенный распор от внутреннего давления газовой среды.

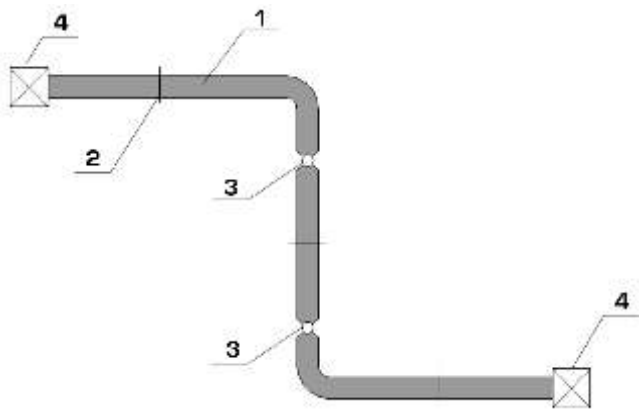
Разновидностью линзовых компенсаторов являются *сильфонные* компенсаторы, представляющие собой гофрированные участки оболочки, вставляемые в трубопровод (рис. 4). Такой участок может иметь различное количество гофр в виде волн-сильфонов, в ряде случаев до 12–15 шт.

Гофрированная оболочка изготавливается, как правило, на специализированных предприятиях из многослойного или однослойного проката, а также из антикоррозионных сталей, собирается в компенсаторы с небольшим весом и не требуют обслуживания в течение всего срока эксплуатации.

*Шарнирные* компенсаторы изготавливаются из линз и допускают значительные взаимные повороты концевых сечений труб. Их устанавливают в разных местах, однако наибольший


**Рис. 4. Сильфонный компенсатор:**

1 – трубопровод; 2 – линзы компенсатора; 3 – стыковые бандажы


**Рис. 5. Блок с шарнирными компенсаторами:**

1 – трубопровод; 2 – плоская опора; 3 – шарнирный компенсатор; 4 – неподвижные опоры

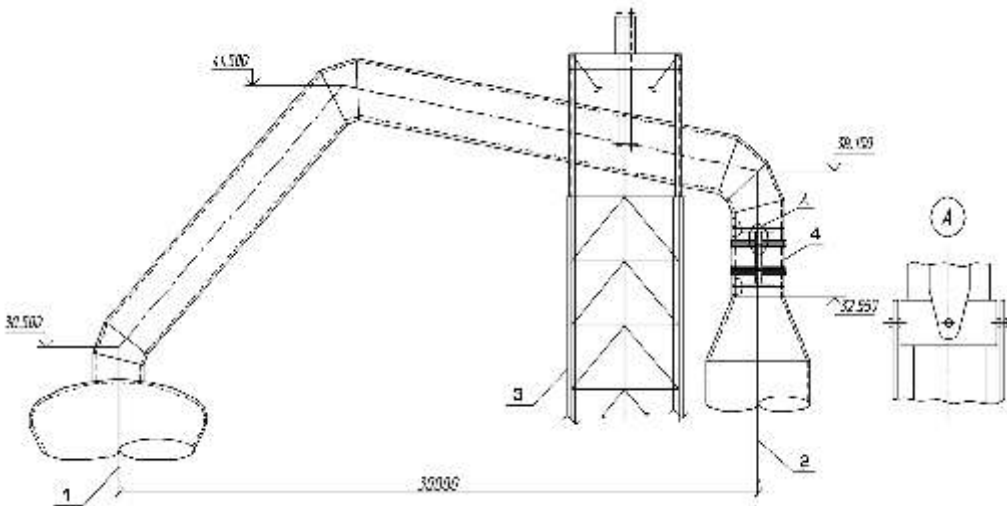
эффект достигается при установке вблизи мест изменения направлений оси трассы либо в точках изменения знака момента (в зоне  $M_{изг} = 0$ ) и на возможно больших расстояниях друг от друга (рис. 5). Шарнирные компенсаторы могут допускать повороты как в одной плоскости, так и в двух, что позволяет их применять в пространственных схемах (рис. 6).

В ряде случаев применение схем с шарнирными компенсаторами достаточно эффективно. Преимущество таких компенсаторов – малые усилия, передаваемые на неподвижные опоры. Усилия, вызванные распором от внутреннего давления, полностью воспринимаются соединительными связями. Компенсирующая способность системы в этом случае зависит от допустимого по прочности угла раскрытия линзы компенсатора.

Схемы с шарнирными компенсаторами не нашли широкого применения в системах промышленных трубопроводов, что объясняется пространственной, как правило, конфигурацией систем, требующей большого количества шарниров, и значительно усложняет их установку.

Все типы волновых компенсаторов обеспечивают надежную плотность узла соединения с трубопроводом. К основным их недостаткам следует отнести возникновение неуравновешенных горизонтальных усилий от давления газовой среды на крайний диск волны (давление на средние диски всегда уравновешено) и практическую неспособность воспринимать вертикальную поперечную нагрузку. В связи с этой небольшой поперечной жесткостью волновых компенсаторов рекомендуется с обеих сторон компенсатора устанавливать близко расположенные опоры.

Появление неуравновешенных усилий приобретает серьезное значение при размещении компенсаторов на трубопроводах с давлением более 30 кПа. Горизонтальные силы здесь значительны, что затрудняет передачу их на опоры и фундаменты. Поэтому при необходимости принимают отдельные меры по «замыканию» компенсаторов путем устройства специальных


**Рис. 6.**

**Схема установки шарнирных компенсаторов:**

1 – трубопровод; 2 – плоская опора; 3 – шарнирный компенсатор; 4 – неподвижная опора

дополнительных конструктивных элементов – затяжек, воспринимающих неуравновешенные усилия от внутреннего давления.

Очень важно устанавливать компенсаторы таким образом, чтобы они воспринимали строго определенный характер деформации. Так, сжатие или растяжение гибкого элемента вдоль продольной оси соответствует работе компенсатора осевого типа, смещение продольных осей его концов с сохранением параллельности между плоскостями этих концов – сдвигового типа, а изгиб компенсатора с образованием угла между плоскостями ее концов – шарнирного типа.

Волновые компенсаторы осевого перемещения устанавливаются на прямых участках, ограниченных неподвижными опорами, воспринимающими усилия от давления и температурных деформаций и имеющих положение в пространстве, не допускающее при деформировании трубопровода их перекосов.

Для предохранения компенсаторов от коррозионного воздействия конденсата во внутреннюю поверхность волн (дисков) целесообразно заливать масло, например, антраценовое. Для этого на горизонтальных участках газопроводов осушенного газа в каждую волну компенсаторов врезается штуцер с пробкой, а на газопроводах влажного газа каждая волна должна быть оснащена двумя штуцерами, предназначенными для заливки и спуска масла.

Сальниковые компенсаторы работают по принципу телескопической подвижности, допускают только осевые относительные смещения концов труб и исключают возможность поворота. Поэтому их устанавливают только на прямолинейных участках достаточной протяженности между концевыми неподвижными опорами. При несоблюдении этого правила в компенсаторе образуется перекосяк, приводящий к его заклиниванию. Герметизация достигается использованием сальниковой набивки, сжимаемой механическим способом. В качестве набивки возможно применение прографиченного асбестового шнура и термостойкой резины.

К недостаткам сальниковых компенсаторов можно отнести возможное нарушение их плотности в процессе эксплуатации, что связано со сроком службы уплотнителей, входящих в его конструкцию. Такие компенсаторы требуют постоянного ухода – необходимо менять отработанные уплотнительные детали, проверять их затяжку и т.д. Поэтому их применение допуска-

ется вне помещений только на газопроводах низкого давления до 40 кПа.

В последнее время находят широкое применение *ленточные компенсаторы* – неметаллические гибкие вставки из транспортерной ленты, силиконовой резины и других эластичных материалов. Такие компенсаторы обеспечивают восприятие перемещений широкого диапазона осевых и угловых направлений и применяются в трубопроводах с давлением до 30 кПа и температурой внутренней среды до 200 °С (рис. 7).

При более высоких температурах газовой среды (до 400–600 °С) и давлении до 30 кПа применяются вставки из специальной жаростойкой компенсаторной ленты, а также специальные компенсаторные вставки из жаростойкого материала, способные работать при повышенном давлении, высокой температуре и компенсировать деформации в размере до 70 % своих размеров.

Известны ленточные тканевые компенсаторы для агрессивных сред, изготавливаемые из композитных материалов на основе тканей с фторопластовым ламинированием или на основе химически стойких эластомеров. Материалы имеют армирование из высокопрочных материалов, таких как кевлар, сетки из нержавеющей стали, стеклоткани и прочие.

Такие компенсаторы способны работать при температуре до 1200 °С. Максимальное рабочее давление может достигать 0,05 МПа, кратковременное – 0,07 МПа (хлопки или аварийная ситуация).

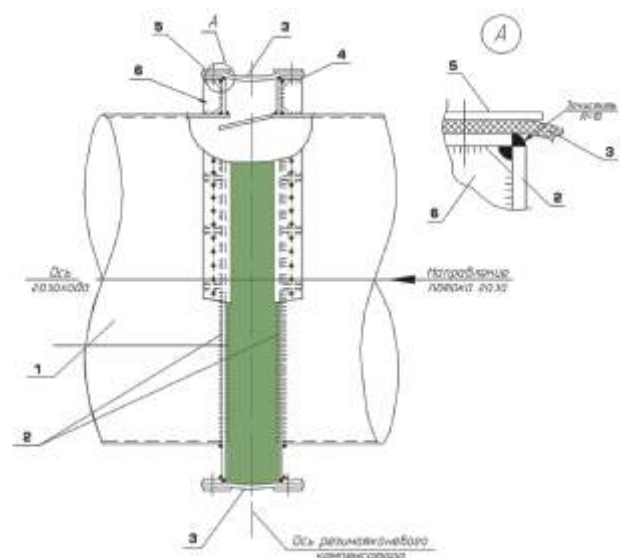
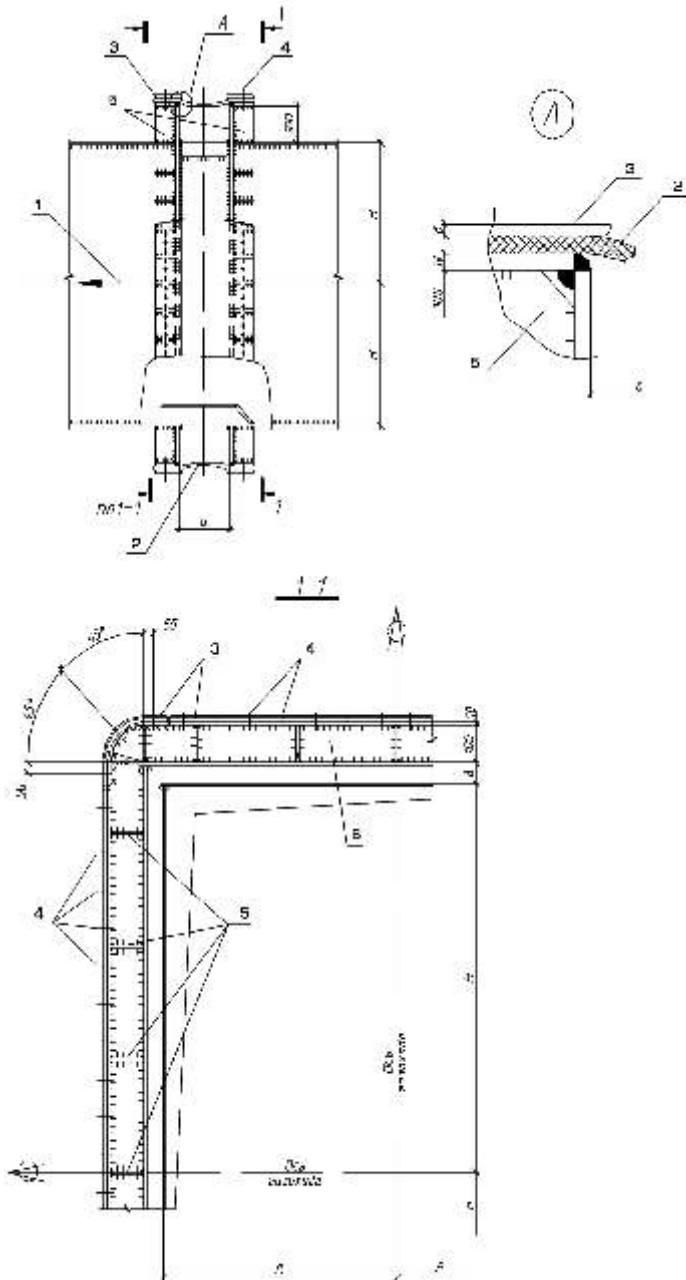


Рис. 7. Гибкий компенсатор на круглой трубе:

1 – трубопровод; 2 – кольцевые ребра жесткости; 3 – гибкая вставка; 4 – фланцы крепления гибкой вставки; 5 – прижимное кольцо; 6 – ребра жесткости



**Рис. 8. Гибкий компенсатор на прямоугольной трубе:**

1 – направление потока газа; 2 – тканевая часть компенсатора; 3 – прижимная планка; 4 – болты М12 через 100 мм; 5 – ребра жесткости; 6 – опорная рама; а – расчетное перемещение

Эффективность их постановки высока как относительно собственной стоимости, так и в виду отсутствия усилий от температурных перемещений и неуравновешенного внутреннего давления.

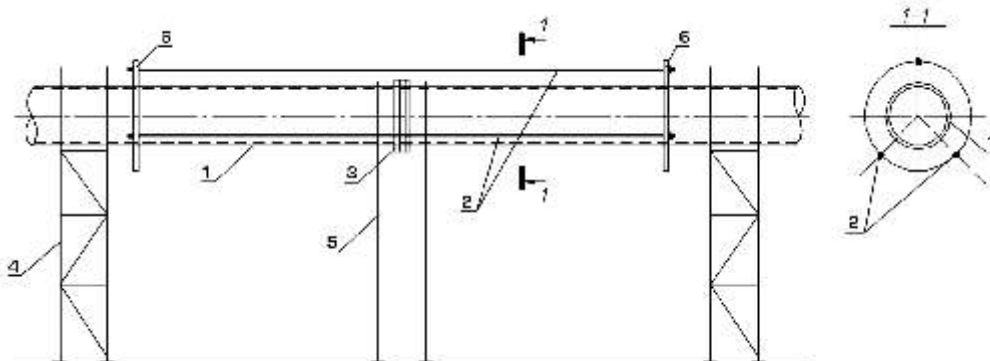
Весьма важным положительным качеством ленточных компенсаторов является также их способность работать в условиях высокой цикличности нагрузок.

В системах газоочистки некоторых металлургических предприятий, в частности, конвертерных производств, режим работы трубопроводов связан с циклическими изменениями внутреннего давления или температуры в различных диапазонах. Поскольку в таких условиях дисковые компенсаторы более подвержены усталостным разрушениям, то наиболее целесообразно применение ленточных компенсаторных вставок.

Ленточные компенсаторы широко применяются в системах аспирации, транспортирующих загрязненный воздух. Возможность использования их в газопроводных системах определяется необходимостью обеспечения газоплотности.

Компенсаторы подобного типа могут также устанавливаться и на трубопроводах некруглого поперечного сечения (рис. 8).

При многократных систематических изменениях технологической температуры, вызывающих постоянное деформирование одного или нескольких компенсаторов, с целью исключения передачи неуравновешенных усилий на неподвижные опоры компенсаторы замыкают продольными затяжками, соединяющими между собой смежные неподвижные опоры (рис. 9) или участки трубопровода, температурные перемещения которых воспринимаются компенсаторами. Такая система не требует дополнительных регулировок при любых изменениях температуры. Сечения затяжек подбираются не



**Рис. 9. Установка замкнутого нерегулируемого компенсатора:**

1 – трубопровод; 2 – продольные затяжки; 3 – компенсатор; 4 – неподвижная опора; 5 – плоская опора; 6 – опорные элементы затяжек

тільки по умові прочності, но і з урахуванням обмеження їх упругих деформацій величиною сумарних переміщень системи при максимальній нарузці.

Учитывая громоздкость продольных затяжек и невозможность в ряде случаев их размещения в системах с разовым изменением температуры, например, разогрев при пуске, могут устанавливаться замкнутые компенсаторы (рис. 10). Здесь, по окончании разогрева и «срабатывания» компенсатора до подачи давления можно его «замкнуть» системой коротких болтов. При больших изменениях температур (например, остановка на ремонт) болты должны быть ослаблены. Перемещения, вызванные суточными, сезонными и небольшими технологическими перепадами температур, могут восприниматься системой пружинных шайб, устанавливаемых в таких случаях под гайками болтов.

Приведенные конструктивные и компоновочные мероприятия иллюстрируют возможность в широком диапазоне менять расчетную жесткость трубопроводных систем, добываясь уменьшения и оптимизации температурных

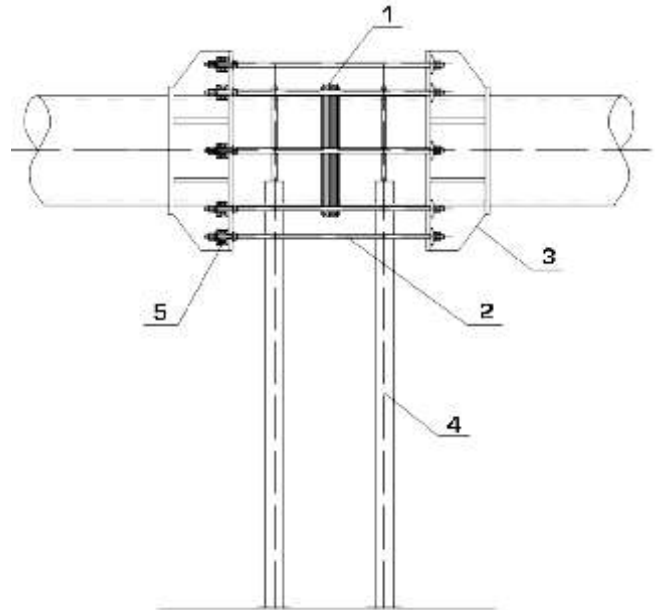


Рис. 10. Установка замкнутого регулируемого компенсатора:

1 – компенсатор; 2 – стяжные болты; 3 – опорные ребра; 4 – опоры трубопровода; 5 – блоки пружин под гайками

усилий и, тем самым, нарузок на опоры и прилегающее оборудование.

- [1] Старицкий В.И. Газовое хозяйство заводов черной металлургии [Текст]: монография / В.И. Старицкий – М.: Металлургия, 1973. – 404 с. – рис., табл. Библиограф. С. 365–381.
- [2] Любин А.Е. Надземные промышленные трубопроводы металлургических предприятий. Металлические конструкции. [Текст]: монография / А.Е. Любин – К.: Сталь, 2013. – 260 с. – рис., табл. Библиограф. С. 254–256.

- [3] Расчет и конструирование трубопроводов [Текст]: коллект. монография / [Б.В. Зверьков, Д.Л. Костовецкий, Ш.Н. Кац и др.]; общ. ред. Б.В. Зверьков – Л.: Машиностроение, 1979. – 245 с. – рис., табл. Библиограф. С. 238–245.
- [4] Расчет трубопроводов на прочность. Справочная книга [Текст]: коллект. монография / [А.Г. Камерштейн, В.В. Рождественский, М.Н. Ручимский] – М.: Недра, 1969. – 440 с. – рис. – Библиогр.: С. 434–437.

Надійшла 21.08.2014 р.

ОФІЦІЙНА ІНФОРМАЦІЯ

**25 листопада 2014 року у м. Києві  
відбулась III Національна конференція  
«СТРАТЕГІЯ РОЗВИТКУ ГАЛУЗІ СТАЛЕВОГО БУДІВНИЦТВА У НОВИХ РИНКОВИХ УМОВАХ»,  
організована Асоціацією «Український центр сталевих будівництва»**

У переліку головних тем, що розглядалися на засіданнях сесій – ситуація на ринку нерухомості та її вплив на розвиток ринку металевих конструкцій, нові технології, що підвищують конкурентоспроможність вітчизняного металобудівництва, перспективи розвитку галузі сталевих будівництва та інші.

На конференції було заслухано 14 доповідей фахівців провідних об'єднань, організацій і підприємств України з проектування, виготовлення та монтажу металевих конструкцій – Метінвесту, Асоціації «Український центр сталевих будівництва», Укрстальконструкції, Раута-Груп, Нілі Україна, ПЕМ-Україна, ГК «Основа», ТОВ «Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського» та інших. Після завершення виступів відбулась дискусія, присвячена широкому колу питань із подолання бар'єрів, що заважають розвитку галузі сталевих будівництва.