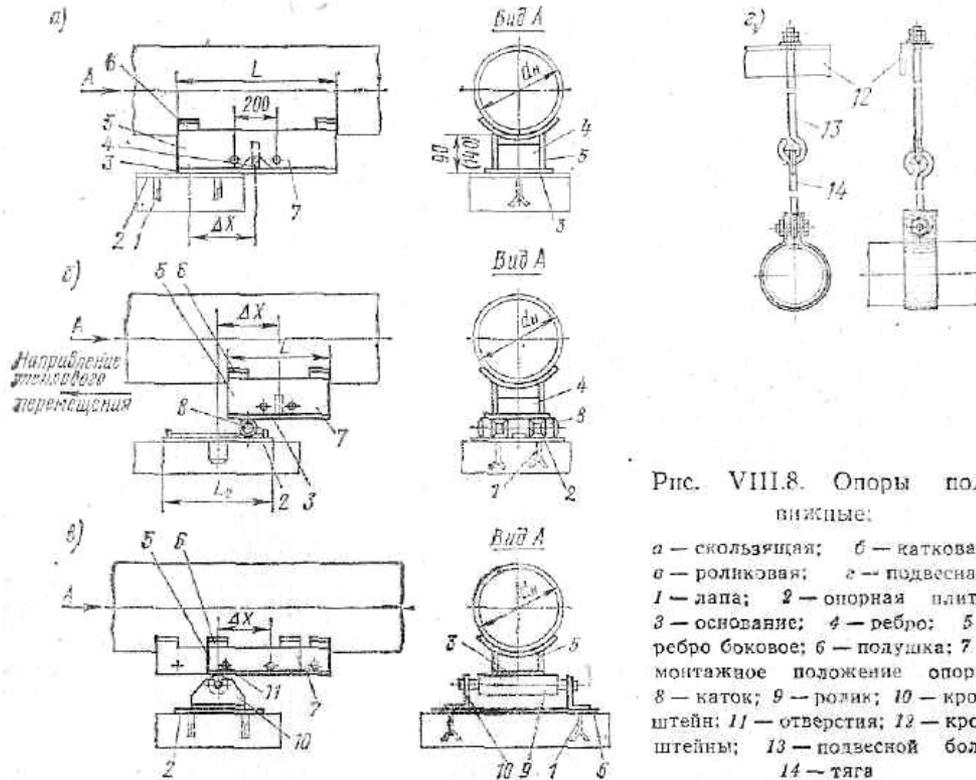


# ПРОЧНОСТНЫЕ РАСЧЕТЫ

## § VIII.2. опоры трубопроводов

Опорные конструкции по своему назначению подразделяют на подвижные и неподвижные.

*Подвижные опоры* (рис. VIII.8) воспринимают вес теплопровода и обеспечивают ему свободное перемещение на строительных конструкциях. Подвижные опоры используют при всех способах прокладки, кроме бесканальной. По принципу свободного перемещения различаются опоры скольжения, качения и подвесные. Скользящие опоры бывают самых разнообразных конструкций.



Все они свободно опираются на несущие строительные конструкции. Для уменьшения сил трения и истирания несущих конструкций в бетон заливают стальную опорную плиту с приваренными к ней лапами для скрепления с бетоном. Типовые конструкции: опоры выполняют высокими и низкими. Высокие опоры (140 мм) применяют для трубопроводов с толщиной теплоизоляции более 80 мм; низкие опоры (90 мм) используют для прокладки трубопроводов с толщиной тепловой изоляции до 80 мм. Отверстия в боковых ребрах опор предназначены для закрепления тепловой изоляции над опорой с помощью проволоки. Опоры скользящего типа применяют при всех способах прокладки трубопроводов различных диаметров.

С увеличением диаметров трубопроводов более 175 мм трение на опорах существенно возрастает. Для уменьшения сил трения применяют опоры качения, разделяющиеся на катковые, роликовые и шариковые. Для вращения катков без скольжения по опорной поверхности необходимо, чтобы горизонтальная сила  $P_r$  трубопровода превышала силы трения качения катка:

$$P_r \geq P_B \frac{f_1 + f_2}{2R}, \quad (\text{VIII.5})$$

где  $P_B$  — вертикальная нагрузка на опору, Н;  $f_1$  — плечо (коэффициент) трения качения при соприкосновении катка с трубопроводом, м;  $f_2$  — плечо (коэффициент) трения качения при соприкосновении катка с опорной поверхностью, м;  $R$  — радиус катка, м. Свободное вращение ролика без заедания в цапфах обеспечивается условием

$$P_r \geq P_B \frac{f_1 + \mu r}{R}, \quad (\text{VIII.6})$$

где  $f_1$  — плечо (коэффициент) трения качения при соприкосновении ролика с трубопроводом, м;  $\mu$  — коэффициент трения скольжения цапфы;  $r$  — радиус цапфы, м;  $R$  — радиус ролика, м.

Для грубо обработанных стальных поверхностей принимается  $f_1 = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м, а  $\mu = 0,3$ . Из сравнения формул (VIII.5) и (VIII.6) можно установить, что при  $f_1 = f_2$  и равных вертикальных нагрузках катковая опора передает на строительную конструкцию наименьшую горизонтальную реакцию. Из этих формул можно также найти размеры катка и ролика, обеспечивающие свободное их вращение.

Выточки в катках и направляющие планки на опорной плите обеспечивают направленное перемещение удлиняющегося трубопровода. При плохом уходе катки и ролики перекашиваются и заклинивают. Заклиненные опоры быстро корродируют, и коэффициент трения в опорах увеличивается. Исследования показали, что искусственно деформированные катки с большими вмятинами все же имеют меньший коэффициент трения, чем скользящие опоры. Поэтому опоры качения рекомендуется применять для разгрузки отдельных стоек, мачт, кронштейнов, не рассчитанных на большие горизонтальные нагрузки, при прокладках трубопроводов диаметром более 175 мм надземным способом и в проходных каналах.

Катковые и роликовые опоры надежно работают на прямолинейных участках сети. На поворотах трассы трубопроводы перемещаются не только в продольном, но и в поперечном направлении. Поэтому установка катковых, а иногда и роликовых опор на криволинейных участках трубопроводов не рекомендуется. Эти ограничения снимаются при использовании шариковых опор. Радиус шариковой опоры может быть установлен из формулы (VIII.5) при  $f_1 = f_2$ . Шариковые опоры применяют в тех же случаях и с той же целью, что и катковые и роликовые опоры, и часто вместо них, особенно на участках горизонтального перемещения трубопроводов под углом к оси трассы.

Подвесные опоры применяют для прокладки водопроводов небольшого диаметра, а также более легких паропроводов диаметром до 500 мм. Нежесткая конструкция подвески позволяет опоре легко поворачиваться и перемещаться вместе с трубопроводом. В результате по мере удаления от неподвижной опоры углы поворота подвесок увеличиваются, соответственно возрастает перекося трубопровода и напряжение в тросах под действием вертикальной нагрузки трубопровода. В силу этого трудно добиться равномерной нагрузки опор и горизонтальности подвешенного трубопровода, поэтому при подвесных опорах недопустимо применение сальниковых компенсаторов, весьма чувствительных к перекосям. Неравномерность нагрузки опор уменьшается с использованием более дорогих пружинных подвесных опор, в которых равномерное распределение усилий обеспечивается регулировкой натяжения пружин. Для уменьшения напряжений и перекося трубопровода необходимо принимать длину подвески  $l$  для водяных тепловых сетей равной  $l \geq 10 \Delta l$ , а для паропроводов —  $l \geq 20 \Delta l$ , где  $\Delta l$  — перемещение подвески, наиболее удаленной от неподвижного закрепления опоры. Пружинные подвесные опоры целесообразно применять на участках вертикального перемещения трубопроводов.



*Неподвижные опоры* (рис. VIII.9) служат для разделения теплопроводов на участки, независимые друг от друга в воспринятая усилий от температурных деформаций и внутреннего давления. Размещают неподвижные опоры между компенсаторами и участками трубопроводов с естественной компенсацией температурных удлинений. Неподвижное закрепление трубопроводов выполняют различными конструкциями в зависимости от способа прокладки сетей.

Лобовые опоры применяют главным образом в камерах, проходных и полупроходных каналах. Упорную конструкцию выполняют из швеллеров разных номеров, заделанных в днищах и перекрытиях сооружения.

Щитовые опоры используют для неподвижного заземления труб в камерах (см. рис. IX.8), непроходных каналах и при бесканальных прокладках (рис. VIII. 10). Осевая нагрузка трубопроводов через щитовые опоры передается на дно и стенки канала, а в бесканальных прокладках — на вертикальную плоскость грунта. Отверстия в упорных стенках делают на 20—40 мм больше диаметра теплопровода. Зазор заполняют картонным или шнуровым асбестом, предупреждающим разрушение бетона при высоких температурах теплоносителя. Большой зазор обеспечивает также свободное перемещение трубы при просадке теплопровода. Дренажное отверстие в стенке делают на уровне дна канала для пропуска дренируемой воды.

Хомутовые неподвижные опоры удобны для закрепления труб, уложенных на балках, кронштейнах и других устройствах.

Провисание трубопровода во многом зависит от размещения точек опоры. Равномерное распределение большой массы трубопровода по точкам опоры лучшим образом сохраняет заданное направление трубопровода. Допустимое расстояние между опорами определяется рядом условий: 1) диаметром и толщиной стенки трубы, характеризующими несущую способность трубопровода; 2) параметрами и родом теплоносителя; 3) способом компенсации температурных удлинений; 4) уклоном трубопровода; 5) способом прокладки тепловых сетей.

Водяные трубопроводы значительно тяжелее паропроводов, поэтому расстояния между опорами на паропроводах несколько больше, чем на водяных линиях. Сальниковые компенсаторы очень чувствительны к перекосам и изгибам труб, устранение которых достигается более частым размещением опор. Уклоны трубопроводов уменьшают вертикальную составляющую нагрузки, тем самым способствуют увеличению допустимого пролета между опорами.

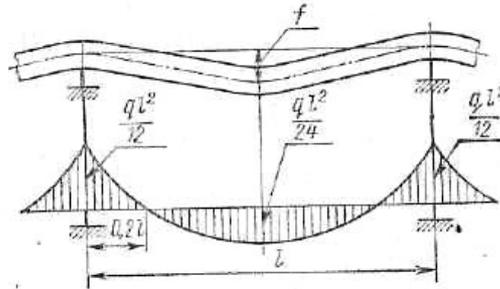


Рис. VIII.11. Прогиб трубопровода и эпюра изгибающих моментов многопролетного трубопровода

Трубопровод рассматривается как многопролетная неразрезная балка (рис. VIII.11), в которой максимальный изгибающий момент над опорой вдвое превышает изгибающий момент в середине пролета:

$$M_0 = ql^2/12 = 2M_n, \quad (\text{VIII.7})$$

Где  $M_0$ ,  $M_n$  — изгибающий момент над опорой и в середине пролета, Н·м;  $q$  — полная удельная нагрузка на метр длины трубопровода, Н/м;  $l$  — пролет между опорами, м.

Полная удельная нагрузка определяется из выражения

$$q = \sqrt{q_B^2 + q_r^2}, \quad (\text{VIII.8})$$

где  $q_B$  — удельная вертикальная нагрузка от массы трубы, теплоносителя, теплоизоляции и снега;  $q_r$  — удельная горизонтальная нагрузка от ветрового давления.

Удельная нагрузка ветрового давления определяется по графикам [28] или по формуле

$$q_r = K \frac{\omega^2}{2} \rho d_m, \quad (\text{VIII.9})$$

где  $K$  — аэродинамический коэффициент (для одиночных труб  $K=0,7$ , для двух и более труб  $K=1$ );  $\omega$  — скорость ветра, м/с;

$\rho$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $d_n$  — диаметр изолированного трубопровода, м.

Снеговая и ветровая нагрузки учитываются только при воздушной прокладке тепловых сетей. Значение удельной снеговой нагрузки подсчитывается из нагрузки снега, приходящейся на 1 м<sup>2</sup> горизонтальной площади изолированного трубопровода, которая в среднем равна 500—1000 Н/м<sup>5</sup>.

Допустимое расстояние между опорами определяется из условий прочности и допустимой стрелы прогиба трубы на середине пролета для наиболее неблагоприятных режимов работы теплопровода, при которых в самом ослабленном сечении (обычно сварные стыка) напряжения не должны превышать допустимых. Заменяя в выражении (VIII.7) значение изгибающего момента равенством  $M_0 = [\sigma_{и}]W$ , найдем допустимое расстояние между опорами

$$l = \sqrt{\frac{12 [\sigma_{и}] W^2}{q}}, \quad (\text{VIII.10})$$

где  $[\sigma_{и}]$  — допустимое изгибающее напряжение, Па;  $W$  — момент сопротивления трубы, м<sup>3</sup>.

Допустимое напряжение изгиба принимается в зависимости от типа трубы, способа прокладки и компенсации температурных удлинений трубопровода. В непроходных каналах наблюдается перераспределение напряжений трубопровода вследствие неравномерной просадки опор. Из выражения (VIII.7) следует, что при просадке одной из опор расстояние между точками опирания трубы возрастает вдвое, а изгибающий момент и напряжения — в 4 раза. По этим причинам расстояния между опорами в непроходных каналах принимаются меньшими, чем при других прокладках.

Значение допустимого напряжения изгиба равно:

$$[\sigma_{и}] = \frac{\eta_1 \sigma_{\text{доп}} \varphi_1}{0,8}, \quad (\text{VIII.11})$$

где  $\eta_1$  — коэффициент, учитывающий способ компенсации температурных удлинений трубы;  $\sigma_{\text{доп}}$  — допустимое напряжение от внутреннего давления;  $\varphi_1$  — коэффициент прочности сварного шва; 0,8 — коэффициент пластичности трубы.

Значения величин, входящих в выражение (VIII.11), принимаются по таблицам и графикам [28]; в приближенных расчетах можно принимать  $[\sigma_{и}] \leq 35$  МПа.

Допустимая стрела прогиба, при которой исключается образование воздушных мешков над опорами, отвечает соотношению

$$f = \frac{qt^4}{384JE} \leq 0,02D_{\text{т}}, \quad (\text{VIII.12})$$

где  $E$  — модуль упругости металла трубы, Па;  $J$  — момент инерции трубы, м<sup>4</sup>.

На поворотах труб расстояния между опорами рекомендуется принимать не более 0,67 от допустимого расстояния на прямом участке трубы, а на участках последней и предпоследней опор до поворота или гибкого компенсатора — не более 0,82.

Подвижные опоры закрепляют на холодном трубопроводе с учетом температурного удлинения трубопровода. Монтажное положение опор любого типа на холодной трубе относительно опорных строительных конструкций (см. рис. VIII.8) рассчитывают для каждой опоры в отдельности по формуле

$$\Delta X = \alpha L_0 \Delta t, \quad (\text{VIII.13})$$

где  $\Delta X$  — величина смещения опоры после прогрева трубы, мм;  $\alpha$  — коэффициент линейного удлинения металла, мм/м·град;  $L_0$  — расстояние подвижной опоры от неподвижного закрепления трубы, м;  $\Delta t$  — разность температур теплоносителя и окружающей среды.

Таким образом, на холодном трубопроводе подвижные опоры должны приваривать со смещением на величину  $\Delta X$  в сторону к ближайшей неподвижной опоре, т. е. против направления теплового перемещения трубы.

Расстояния между неподвижными опорами определяют расчетом на прочность труб. В справочной литературе [28] рекомендуемые расстояния установлены практикой эксплуатации тепловых сетей с учетом компенсирующих способностей сальниковых компенсаторов и допустимых напряжений гибких компенсаторов.

Неподвижные опоры разделяют трубопровод на участки длиной  $L_I, L_{II}$  (рис. VIII.12). На каждую неподвижную опору между прилегающими участками слева и справа действуют осевые усилия  $N_A$  и  $N_B$  от трения опор и реакций компенсаторов. Очевидно, если прилегающие участки выполнены из труб одинакового диаметра и на этих участках трубы опираются на равное число опор, то при  $L_I=L_{II}$  равнодействующая осевых усилий будет минимальна или даже равняться нулю, так как  $N_A=N_B$ . Неподвижные опоры в таком случае называются разгруженными. Таким образом, размещение неподвижных опор на равных расстояниях друг от друга позволяет уменьшить нагрузку, передаваемую на строительные конструкции.

Неподвижные опоры устанавливают на ответвлениях труб, арматуры, сальниковых компенсаторов. На трубопроводах опоры необходимо размещать на середине участка между сальниковыми компенсаторами. В бесканальных прокладках, когда не используются естественные опоры, неподвижные опоры рекомендуется устанавливать на поверхности.

На расстоянии  $0,2 l$  от опоры (см. рис. VIII.11) изгибаются сварные стыки, имеющие пониженную прочность, целесообразно

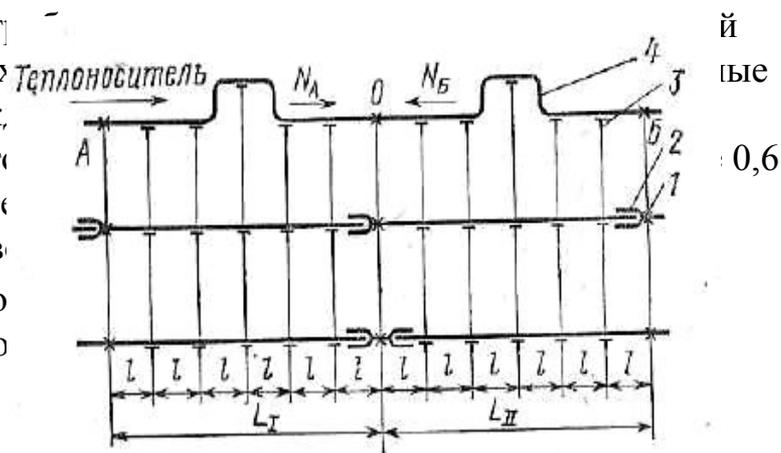


Рис. VIII.12. Размещение опор на трубопроводе:

1 — неподвижная опора; 2 — сальниковый компенсатор; 3 — подвижная опора; 4 — П-образный компенсатор

### § VIII. 3. КОМПЕНСАТОРЫ

Неподвижное закрепление трубопроводов производят для предупреждения самопроизвольного его смещения при удлинениях. Но при отсутствии устройств, воспринимающих удлинения трубопроводов между неподвижными закреплениями, возникают большие напряжения, способные деформировать и разрушать трубы. Компенсация удлинений труб производится различными устройствами (рис. VIII. 13), принцип действия которых можно разделить на две группы: 1) радиальные или гибкие устройства, воспринимающие удлинения теплопроводов изгибом (плоских) или кручением (пространственных) криволинейных участков труб или изгибом специальных эластичных вставок различной формы; 2) осевые устройства скользящего и упругого типов, в которых удлинения воспринимаются телескопическим перемещением труб или сжатием пружинящих вставок.

Гибкие компенсирующие устройства самые распространенные. Наиболее простая компенсация достигается естественной гибкостью поворотов самого трубопровода, изогнутого под углом не более  $150^\circ$ . При естественной компенсации трубопроводов в каналах необходимо обеспечить между стенками канала и наружной поверхностью изолированного трубопровода зазор, достаточный для свободного удлинения плеч трубы. В бесканальных прокладках для использования естественной компенсации на участках поворотов должны быть сооружены непроходные каналы соответствующих поперечных размеров.

Для естественной компенсации могут быть использованы подъемы и опуски труб, но естественная компенсация не всегда может быть предусмотрена. К устройству искусственных компенсаторов следует обращаться лишь после использования всех возможностей естественной компенсации.

На прямолинейных участках компенсация удлинений труб решается специальными гибкими компенсаторами различной конфигурации. Лирообразные компенсаторы, особенно со складками, из всех гибких компенсаторов обладают наибольшей эластичностью, но вследствие усиленной коррозии металла в складках и повышенного гидравлического сопротивления применяются редко. Более распространены П-образные компенсаторы со сварными и гладкими коленами; П-образные компенсаторы со складками, как и лирообразные, по указанным выше причинам применяются реже.

Достоинством гибких компенсаторов является то, что они не нуждаются в обслуживании и для их укладки в нишах не требуется сооружение камер. Кроме того, гибкие компенсаторы передают на неподвижные опоры только реакции распоров. К недостаткам гибких компенсаторов относятся: повышенное гидравлическое сопротивление, увеличенный расход труб, большие габариты, затрудняющие их применение в городских прокладках при насыщенности трассы городскими подземными коммуникациями. Линзовые компенсаторы относятся к осевым компенсаторам в пружного типа. Компенсатор собирается на сварке из полулинз, изготовленных из высокопрочных сталей. Компенсирующая способность одной конструкции компенсатора допускается объединять 3—4 линзы потери упругости и выпучивания линз. Каждая линза допускает поэтому линзовые компенсаторы можно использовать при создании больших перекосы труб.

Отечественной промышленностью линзовые компенсаторы. Наиболее совершенной разновидностью линзовых компенсаторов шарнирного типа, выпускаемые на  $P_y \leq 2,5$  МПа. Эти компенсаторы, установленные на S- и Z-образных участках, увеличивают компенсирующую способность изломанного участка

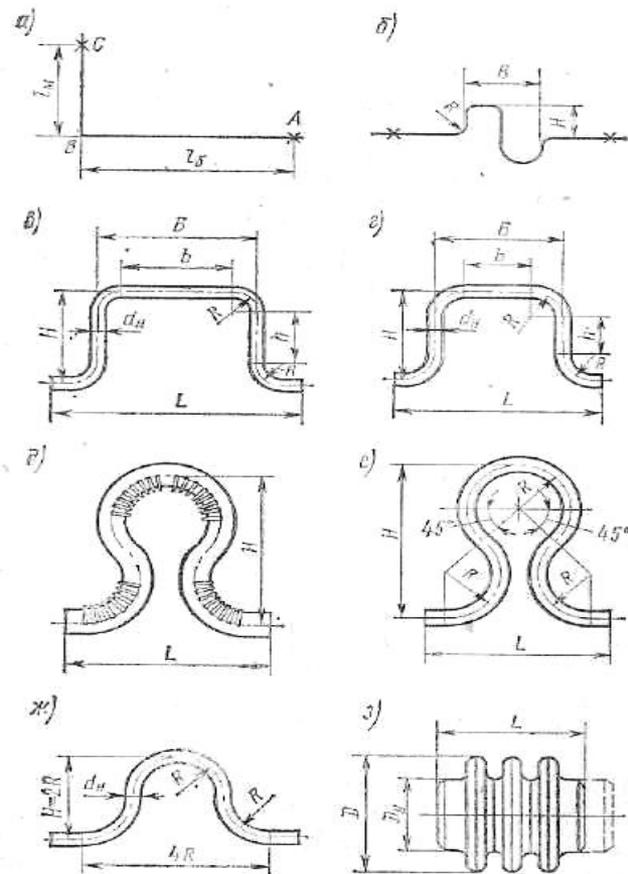


Рис. VIII.13. Типы компенсирующих устройств:

- а** — естественная компенсация; **б** — S-образный компенсатор; **в** — П-образный компенсатор с большой спинкой; **г** — то же, равносторонний ( $b=H$ ); **д** — дирообразный компенсатор со складками; **е** — то же, гладкозагнутый; **ж** — ф-образный; **з** — линзовый компенсатор

Осевая компенсация скользящего типа создается сальниковыми компенсаторами. К настоящему времени устаревшие чугунные литые конструкции на фланцевых соединениях повсеместно вытеснены легкой, прочной и простой в изготовлении стальной сварной конструкцией, показанной на рис. VIII.14. Типовые сальниковые компенсаторы изготавливают из стандартных труб. Компенсатор состоит из корпуса, стакана и уплотнительных приспособлений. При удлинении трубопровода стакан вдвигается в полость корпуса. Герметичность скользящего соединения корпуса и стакана создается сальниковой набивкой, которая готовится из плетеного в квадратное или круглое сечение прографиченного асбестового шнура, пропитанного цилиндрическим маслом. Скосы кромок на буксах способствуют более плотному прижатию набивки к поверхности стакана. Набивка со временем истирается и теряет упругость, для восстановления плотности конструкции производят подтяжку сальника. Многократные подтяжки значительно увеличивают силы трения в сальнике, в результате частично или полностью утрачивается компенсирующая способность. Лучшие результаты дает периодическая замена сальниковой набивки.

Перекосы осей корпуса и стакана приводят к заеданию и заклиниванию компенсатора, поэтому при монтаже требуется соблюдать высокую точность соосной укладки труб на подходах со стороны подвижного стакана. Для этого на двух пролетах, примыкающих к стакану, допустимое расстояние между подвижными опорами рекомендуется уменьшать в 2 раза.

Сальники требуют постоянного надзора, для их обслуживания необходимо сооружение камер больших размеров. Для уменьшения числа дорогостоящих камер применяют сальниковые компенсаторы двустороннего действия. Компенсаторы устанавливают на водяных и паровых сетях при условном давлении до 2,5 МПа. На трубопроводах малого диаметра (до 100—150 мм), обладающих большой гибкостью, компенсаторы работают плохо, часто дают течи.

Компенсация температурных удлинителей трубопроводов назначается при средней температуре теплоносителя более +50°С. Тепловые перемещения теплопроводов обусловлены линейным удлинением труб при нагревании. Тепловое удлинение трубопровода (в мм) между опорами рассчитывают по формуле

$$\Delta l_1 = \alpha L(t - t_0),$$

(VIII.14)

где  $L$  — длина трубопровода между неподвижными опорами, м;  $t$  — температура теплоносителя, °С;  $t_0$  — температура окружающей среды, °С.

Коэффициент линейного удлинения а стальных труб принимается в зависимости от температуры [11, 23, 28]; в среднем он равен 0,012 мм/м·°С.

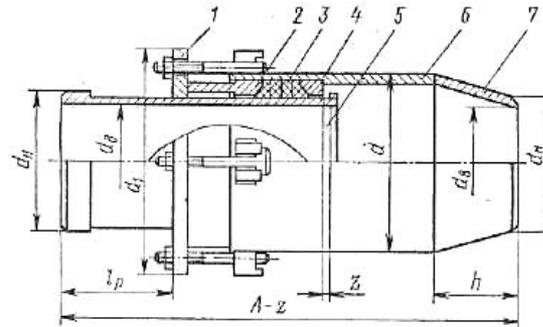


Рис. VIII.14. Бесфланцевый односторонний сварной сальниковый компенсатор:  
 1 — навинчивной фланец; 2 — грундбукса; 3 — сальниковая набивка; 4 — контрбукса; 5 — стакан;  
 6 — корпус; 7 — переход диаметров

Для безаварийной работы тепловых сетей необходимо, чтобы компенсирующие устройства были рассчитаны на максимальные удлинения трубопроводов. Исходя из этого при расчете удлинений температура теплоносителя принимается максимальной, а температура окружающей среды — минимальной и равной: 1) расчетной температуре наружного воздуха при проектировании отопления — для наземной прокладки сетей на открытом воздухе; 2) расчетной температуре воздуха в канале — для канальной прокладки сетей; 3) температуре грунта на глубине заложения бесканальных теплопроводов при расчетной температуре наружного воздуха для проектирования отопления.

#### § VIII.4. РАСЧЕТ КОМПЕНСАТОРОВ

При изгибе гибких компенсаторов круглое сечение трубы сплющивается в эллиптическое, жесткость которого значительно понижается. Коэффициент жесткости гибких отводов зависит от геометрической характеристики отвода, представляющей собой отношение

$$h = SR/r_c^2$$

(VIII.15)

где  $S$ —толщина стенки трубы;  $R$ — радиус изгиба отвода;  $r_c$  — средний радиус трубы,  $r_c = (d_H - S)/2$ , где  $d_H$  — наружный диаметр трубы.

При  $h \leq 1$  коэффициент жесткости гладкого отвода определяется по формуле Кларка и Рейснера

$$K = h/1,65; \quad (\text{VIII.16})$$

при  $h > 1$  — по формуле Кармана

$$K = \frac{1+12h^2}{10+12h^2}. \quad (\text{VIII.17})$$

В сплюсненном сечении трубы напряжения изгиба несколько уменьшаются и учитываются коэффициентом напряжения, который для гладких отводов определяется зависимостью

$$m = 0,9/h^{0,66}. \quad (\text{VIII.18})$$

Для сварных отводов значения коэффициентов  $K$  и  $t$  принимаются равными единице. Изгибающие напряжения в отводах с учетом коэффициентов напряжения равны

$$\sigma_{из} = Mm/W, \quad (\text{VIII.19})$$

где  $M$ —изгибающий момент в сечении изогнутой трубы;  $W$  — момент сопротивления трубы.

В трубопроводах, заземленных неподвижными опорами на одной. прямой линии (рис. VIII. 15), расчет изгибающих усилий основан на теории изгиба прямого бруса. Согласно этой теории усилие  $P$ , действующее по оси трубопровода, определяется выражением

$$P = \frac{\Delta l E J}{\int_0^u \frac{h^3 dh}{K}}, \quad (\text{VIII.20})$$

где  $\Delta l$ —величина деформации участка трубы по направлению действующей силы;  $h$ —расстояние от середины элементарного участка трубы до направления действующей силы;  $dh$ — длина элементарного участка трубы.

Изгибающий момент в рассматриваемом сечении  $r$  учетом значения усилия  $P$  после преобразования при

где

$$\sigma_{\text{н}} = \frac{\Delta l E d_{\text{н}} h m}{2A},$$

Из вь  
любого  
(VIII.11)

$$A = \int_0^R \frac{h^2 dh}{K}.$$

(VIII.21)

(VIII.22)

ИСИМО  
ЗНИТЬ С  
 $h=H:$

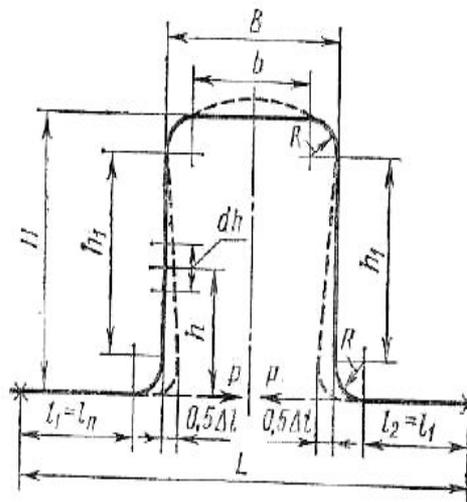


Рис. VIII.15. Схема П-образного компенсатора:

$H$  — плечо (вылет) компенсатора;  
 $B$  — спинка компенсатора

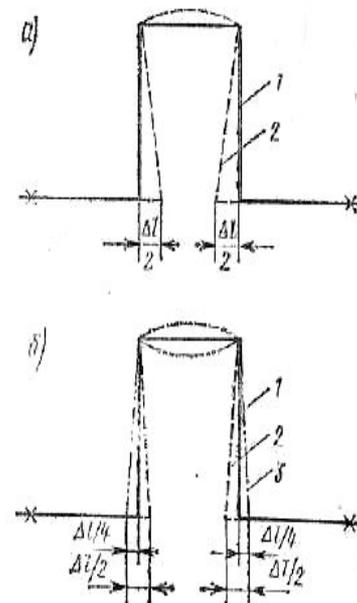


Рис. VIII.16. Схема деформации П-образного компенсатора:

$a$  — без предварительной растяжки;  $b$  — с предварительной растяжкой; 1 — положение компенсатора в колодном ненапряженном состоянии; 2 — рабочее состояние; 3 — предварительная растяжка колодного компенсатора

$$\Delta l = \frac{2 [\sigma_{\text{н}}] A}{E d_{\text{н}} H m}.$$

(VIII.23)

Для увеличения компенсирующей способности гибких компенсаторов и уменьшения компенсационных напряжений рекомендуется производить предварительную их растяжку. Плечи П-образного компенсатора без предварительной растяжки в рабочем состоянии перемещаются на величину  $0,5 \Delta l$  (рис. VIII.16). Компенсирующая способность такого компенсатора равна величине полного удлинения участка трубопровода  $\Delta l$ . При этом на внешней стороне сцинки возникают растягивающие напряжения, на внутренней— сжимающие. В компенсаторе с предварительной растяжкой в колодном состоянии трубопровода, например на 50% от полного теплового удлинения, в спинке образуются напряжения, обратные по знаку рабочему напряжению. В этом положении внешняя сторона спинки сжата, внутренняя растянута.

В рабочем положении, когда трубопровод прогреется до температуры теплоносителя, плечи компенсатора переместятся также на величину  $0,5 \Delta l$ , но относительно ненапряженного состояния сдвинутся на величину  $0,25 \Delta l$ . При этом рабочее напряжение в компенсаторе будет значительно меньше, чем рабочее напряжение компенсатора без предварительной растяжки. Чтобы в рабочем состоянии компенсатора с предварительной растяжкой возникли такие же напряжения, как в компенсаторе без предварительной растяжки, плечи компенсатора должны переместиться дополнительно на величину  $0,25 \Delta l$ .

Величина предварительной растяжки принимается в зависимости от температуры теплоносителя. При расчете гибких компенсаторов на компенсацию учитывается не полное, а расчетное тепловое удлинение трубопровода, так как в процессе продолжительного воздействия нагрузки при высоких температурах происходит постепенное понижение напряжений. Расчетное тепловое удлинение трубопровода учитывается коэффициентом  $\varepsilon_1$ :

$$\Delta X_{\text{р}} = \varepsilon_1 \Delta l_{\text{т}}, \quad (\text{VIII.24})$$

где  $\varepsilon_1$  — коэффициент, учитывающий релаксацию напряжений и предварительную растяжку компенсаторов ( $\varepsilon_1 = 0,5$  при температуре теплоносителя до  $250^\circ\text{C}$ );  $\Delta l_{\text{т}}$  — полное тепловое удлинение, рассчитываемое по формуле (VIII.14).

Компенсирующая способность гибких компенсаторов с предварительной растяжкой определяется зависимостью

$$\Delta X_{\text{в}} = \Delta l / \varepsilon_1, \quad (\text{VIII.25})$$

где  $\Delta l$  — находится из выражения (VIII.23).

Подставляя в (VIII.23) значение интеграла  $A$ , найденное по формуле (VIII.22) для конкретной схемы гибкого компенсатора, можно получить расчетное уравнение компенсирующей способности для различных симметричных компенсаторов. С помощью уравнений (VIII.20), (VIII.23) и (VIII.24) могут быть найдены усилия, вызывающие деформацию, и фактические напряжения в компенсаторе принятых размеров.

При выводе выражения (VIII.23) влияние гибкости трубопровода между неподвижными опорами не учитывалось. Вместе с тем установлено, что с увеличением длины прямолинейного участка от неподвижной опоры до компенсатора  $l_n > 40 D_y$  деформация компенсатора уменьшается вследствие повышения гибкости трубопровода и передачи реакций сил трения подвижных опор и заземляющего момента неподвижных опор, действующих в противоположном направлении реакции  $P$  (на рис. VIII.15). Поэтому при расчете П-образных компенсаторов с короткими прямыми участками  $l_n < 40 D_y$  вводятся поправки, приведенные в табл. VIII. 1.

Таблица VIII.1 Значения поправочных коэффициентов для расчета П-образных компенсаторов

Длина прямого участка	Коэффициенты поправки	
	к компенсирующей способности $n_1$	к силе деформации $n_2$
$40 D_y$	1	1
$10 D_y$	0,9	1,3
$0 D_y$	0,8	1,7

Примечание. При других значениях  $l_n$  поправочные коэффициенты определяются интерполяцией.

В трубопроводе с компенсаторами, смещенными от середины пролета в сторону одной из неподвижных опор ( $l_1 > l_2$  или  $l_1 < l_2$ ), силы  $P$  и напряжения увеличиваются примерно на 20—40% по сравнению с симметрично расположенными компенсаторами ( $l_1 = l_2$ ). Расчетное тепловое удлинение во всех случаях определяется по фактическому расстоянию между неподвижными опорами.

Расчеты по формулам (VIII.20) — (VIII.25) могут быть заменены унифицированными номограммами (рис. VIII. 17), разработанными ВГПИ ТЭП для различных размеров и конструкций компенсаторов. Эти номограммы построены без учета предварительной растяжки и при условии равенства прямолинейных участков  $l_1 = l_2 = l_n = 40 D_y$ , прилегающих с обеих сторон компенсатора.

**Пример.** Найти размеры П-образного компенсатора, установленного на трубопроводе с наружным диаметром 273 мм. Расстояние между неподвижными опорами 110 м. Температура теплоносителя 245°C, температура окружающей среды —33°C.

Решение. Коэффициент линейного удлинения трубы при температуре 245°C равен 0,0131 мм/м·°C [28]. Тепловое удлинение трубопровода по формуле (VIII.14) составляет  $\Delta l_1 = 0,0131 \cdot 110[245 - (-33)] = 400$  мм.

Расчетное тепловое удлинение с учетом предварительной растяжки компенсатора на половину теплового удлинения равно  $\Delta X_n = 0,5 \cdot 400 = 200$  мм.

Примем радиус гнутья гладких отводов 1000 мм и толщину стенки трубы 8 мм. Далее примем компенсатор с длиной спинки  $B=6$  м. Для этих данных на рис. VIII.17 ход решения показан стрелками: потребный вылет компенсатора  $H=5,4$  м, сила упругой деформации  $P_k = 0,9$  тс.

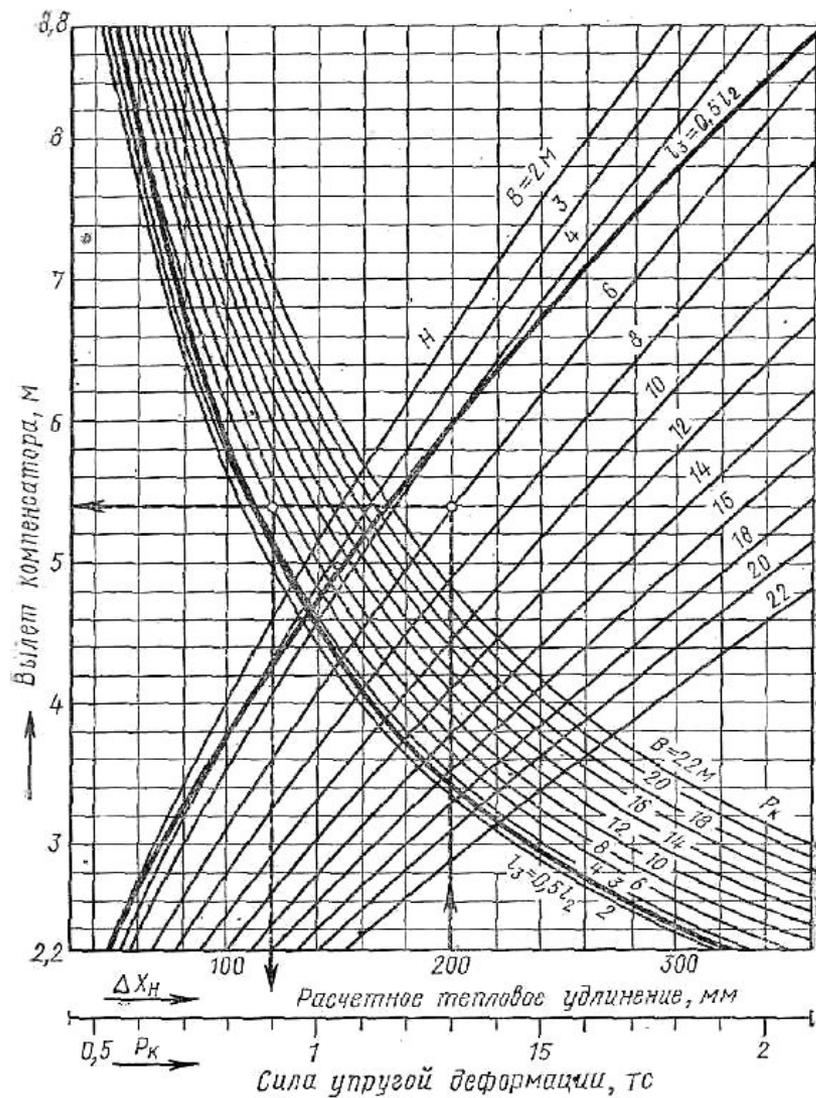


Рис. VIII.17. Номограмма для расчета П-образного компенсатора с гнутыми гладкими отводами (при  $d_H=273$  мм,  $S=8$  мм,  $R=1000$  мм):

$P_K$  — усилие компенсатора

Фактическая длина прямых участков труб с каждой стороны компенсатора равна

$$l_{\text{ф}}^{\text{ф}} = (L - B)/2 = (110 - 6)/2 = 52 \text{ м.}$$

Длина прямого участка, по которой составлена номограмма:  $l_{\text{н}} = 40 - 0,25 = 10 \text{ м}$ . Так как фактическая длина прямых участков значительно больше нормативных, то вводить поправки на компенсирующую способность компенсатора и упругую силу деформации не следует.

По величине  $\Delta X_{\text{н}} = 200 \text{ мм}$  можно принять и другие размеры компенсатора. Например,  $B = 10$  и соответствующий вылет будет  $H = 4,4 \text{ м}$ , при этом сила деформации компенсатора возрастает до  $1,17 \text{ тс}$ . Таким образом можно подобрать такие размеры, при которых сила деформации будет минимальной. Но при выборе размеров компенсатора необходимо учитывать местные условия для размещения вылетов и плеч.

Компенсирующая способность сальникового компенсатора определяется свободным ходом стакана в корпусе, но расчетная компенсирующая способность принимается меньше хода стакана

$$l_{\text{р}} = l - z, \quad (\text{VIII.26})$$

Где  $l$  — свободный ход стакана;  $z$  — неиспользуемая компенсирующая способность, оставляемая на случай понижения температуры воздуха ниже расчетной температуры монтажа ( $z = 50 \text{ мм}$  на каждый стакан компенсатора).

Так как величина теплового удлинения участков может быть различной, то расчетная компенсирующая способность не всегда используется полностью. В таких случаях установочная длина компенсатора, необходимая для определения потребной длины камеры, определяется разностью

$$l_{\text{у}} = A - z - (l - \Delta l_1), \quad (\text{VIII.27})$$

где  $A$  — длина компенсатора при полностью выдвинутом стакане;  $l_{\text{у}}$  — установочная длина компенсатора;  $\Delta l_1$  — тепловое удлинение трубы на участке.

Перед присоединением компенсатора с трубами стакан выдвигается из корпуса на монтажную длину, определяемую по температуре наружного воздуха, при которой производится монтаж. Монтажная длина компенсатора устанавливается расчетом по формуле

$$l_M = l_y - \alpha (t_M - t_0) L, \quad (\text{VIII.28})$$

где  $t_M$  — температура воздуха во время установки компенсатора.

Перемещению стакана в компенсаторе препятствует трение, возникающее в сальниковой набивке. Сила трения набивки (в Н) определяется по формуле

$$P_K = 2\pi d_H b P_{\text{раб}} \mu, \quad (\text{VIII.29})$$

где  $d_H$  — наружный диаметр стакана (принимается на 1—3 мм меньше наружного диаметра трубы, из которой выполнен стакан), м;  $b$  — длина сальниковой набивки, м;  $P_{\text{раб}}$  — рабочее давление теплоносителя, Па;  $\mu$  — коэффициент трения набивки по металлу ( $\mu=0,15$ ).

Компенсирующая способность линзовых компенсаторов принимается в зависимости от числа линз, и она обычно приводится в паспорте завода изготовителя. Осевое усилие линзовых компенсаторов складывается из составляющих:

$$P_K = P_1 + P_2, \quad (\text{VIII.30})$$

где  $P_1$  — реакция деформации компенсатора, Н;  $P_2$  — реакция внутреннего давления, Н.

Реакция температурной деформации линзовых компенсаторов рассчитывается по формуле

$$P_1 = \frac{\Delta l_1}{n} \varepsilon_2, \quad (\text{VIII.31})$$

Где  $\Delta l_1$  — тепловое удлинение трубопровода на участке, м;  $n$  — число линз в компенсаторе;  $\varepsilon_2$  — жесткость волны, Н/м (принимается по паспортной характеристике компенсатора).

Реакция внутреннего давления, вызывающая растяжение линз компенсатора, определяется выражением

$$P_2 = \varphi \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) P_{\text{в}}, \quad (\text{VIII.32})$$

где  $\phi$  — коэффициент, зависящий от конструктивных размеров линз (в среднем  $\phi = 0,5 \div 0,6$ );  $D, d$  — наружный и внутренний диаметры линз, м;  $P_u$  — избыточное давление теплоносителя, Па. При расчете гибких самокомпенсирующихся участков различной конфигураций принимают, что неподвижные опоры представляют собой абсолютно жесткие защемления. Расчет реакций защемления и напряжений в защемленных узлах плоских самокомпенсирующихся участков производится в зависимости от соотношения больших  $l_б$  и малых  $l_м$  плеч и угла, образованного между плечами. Для каждой конфигурации таких участков в справочной литературе [28] приведены расчетные формулы и номограммы для определения вспомогательных коэффициентов, входящих в расчетные выражения.

### § VIII.5. КОНСТРУИРОВАНИЕ ТРУБОПРОВОДОВ

Современные трубопроводы выполняются преимущественно из стальных труб, соединенных между собой на сварке. В конструкцию трубопровода входят также различные устройства, предназначенные для распределения теплоносителя к потребителям, облегчения обслуживания трубопровода во время эксплуатации. Правильное конструирование элементов тепловых сетей и размещение обслуживающей арматуры является главным условием надежной эксплуатации системы теплоснабжения.

Как отмечалось ранее (см. § П.6), протяженные магистральные трубопроводы разделяются на секционные участки с перемычками между подающей и обратной линиями (рис. VIII.18). Перемычки выполняют из труб диаметром не менее 0,3 от диаметра магистральной трубы и устанавливают у секционирующих задвижек.

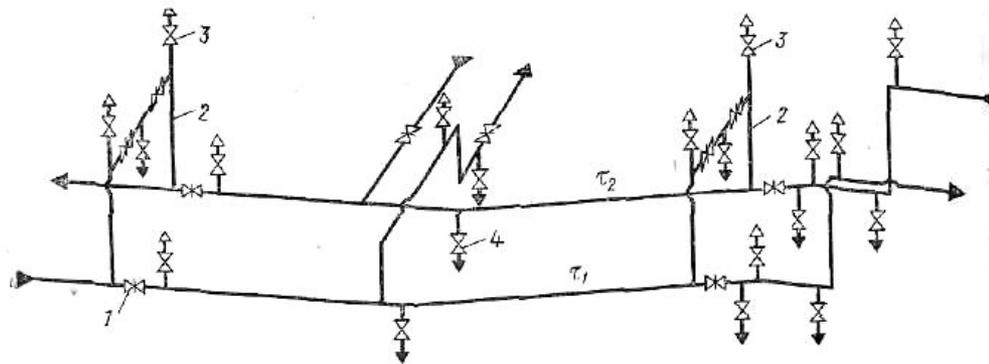


Рис. VIII.18. Схема размещения арматуры на водяных тепловых сетях:  
1 — секционирующая задвижка; 2 — перемычка; 3 — воздушник; 4 — спускной вентиль

На перемычке устраивают две задвижки с контрольным спускным ventилем между ними. Перемычки используют для циркуляции воды при аварийных отключениях сетей и для заполнения трубопроводов водой в пусковой период. С помощью спускных и воздушных ventилей на перемычке ускоряется слив воды и удаление воздуха перед подготовкой сетей к пуску.

Запорная арматура на ответвлениях необходима для отключения потребителей и распределения теплоносителя. Предусматривается она на всех ответвлениях паровых и водяных сетей с диаметром более 100 мм, а также па всех ответвлениях к отдельным зданиям независимо от диаметра трубы.

Для улучшения спуска воды и выпуска воздуха из трубопроводов последние прокладывают уклонм в любую сторону не менее 0,002. На паропроводах минимальный уклон принимается 0,002 по ходу пара и 0,01 при направлении уклона против хода пара.

Спускные устройства (рис. VIII.19) размещают во всех нижних точках трубопровода для спуска воды в установленные нормы времени:

Условный проход трубы, мм	до 300	350—500	более 600
Время спуска воды, ч, не более	2	4	5

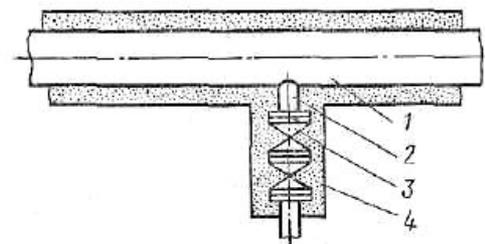


Рис. VIII.19. Конструкция спускников (дренажей) на водяных сетях и пусковых дренажей на паропроводах: 1 — дренажуемый теплопровод; 2 — штуцер; 3 — запорная арматура; 4 — теплоизоляция

Диаметры спускных устройств принимают в зависимости от диаметров дренажуемых трубопроводов [28, 33] или рассчитывают по формуле

$$d = d_{np} a \sqrt[4]{\frac{\sum l}{i_{np}} n}, \quad (VIII.33)$$

где  $d$  — диаметр штуцера и запорной арматуры, м;  $d_{np}$  — приведенный диаметр дренажуемого трубопровода, м;  $a$  — коэффициент расхода арматуры (для ventилей  $a=0,0144$  и  $0,011$  — для задвижек);  $\sum l$  — общая длина дренажуемого участка, м;  $i_{np}$  — приведенный уклон дренажуемого участка трубы;  $n$  — коэффициент, зависящий от времени спуска воды:

Время спуска воды, ч	12	3	4	5
Коэффициент $n$	1	0,72	0,58	0,5

Значения приведенных диаметров и уклонов определяют по формулам

$$d_{\text{пр}} = \frac{\sum d_i l_i}{\sum l}; \quad i_{\text{пр}} = \frac{\sum i_i l_i}{\sum l}, \quad (\text{VIII.34})$$

где  $\sum d_i l_i$  — сумма произведений различных диаметров и длин трубопроводов на дренируемом участке, м<sup>2</sup>;  $\sum i_i l_i$  — сумма произведений различных уклонов и длин трубопроводов на дренируемом участке, м.

При размещении спускного устройства в нижней точке трубопровода диаметр штуцера определяют по формуле

$$d_3 = \sqrt{d_1^2 + d_2^2}, \quad (\text{VIII.35})$$

где  $d_1, d_2$  — диаметры штуцеров, определяемые по формуле (VIII.33) для каждого примыкающего к нижней точке участка трубопровода, м.

На водяных тепловых сетях на дренажном штуцере устанавливают один вентиль. Спускаемая вода должна отводиться в водостоки, канализацию и другие линии сброса. Устройство воздушных вентилей во всех верхних точках водяных тепловых сетей обязательно, так как их открытие ускоряет выпуск воды из отключенного участка трубопровода. Диаметр воздушных штуцеров принимается в зависимости от диаметра трубопровода [28, 33].

Дренирование паропроводов необходимо для периодического или непрерывного отвода конденсата, образующегося от переувлажнения пара или при разогреве холодных труб, в связи с чем дренажи разделяют на пусковые и постоянные со сбором и без сбора конденсата.

*Пусковые дренажи* размещаются во всех нижних точках паропроводов, а также на прямых участках через 200—300 м при встречном уклоне и через 400—500 м при попутном уклоне. Используются они во время прогрева паропроводов в период их пуска после монтажа или ремонта. При рабочем давлении пара до 2,2 МПа на дренажном штуцере устанавливается по одной запорной арматуре, при большем давлении — по две; одна из них служит для регулирования отвода конденсата. На паропроводах с диаметрами до 100 мм дренажные штуцера приваривают непосредственно к трубам, как показано на рис. VIII.19. На паропроводах больших диаметров штуцера приваривают к карманам (рис. VIII.29), предназначенным для улавливания конденсата с большой длины паропровода и предупреждения выброса пара вместе с конденсатом. Пусковые дренажи устраивают без сбора и возврата конденсата.

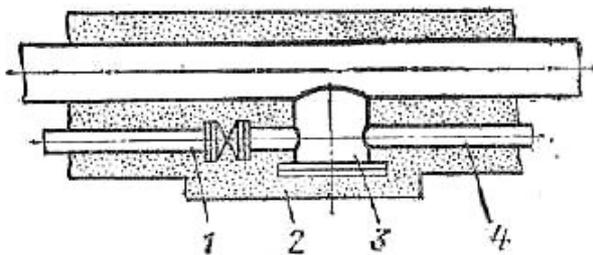


Рис. VIII.20. Совмещенная конструкция постоянного и пускового дренажа паропровода:

1 — пусковой дренаж; 2 — теплоизоляция;  
3 — карман; 4 — постоянный дренаж

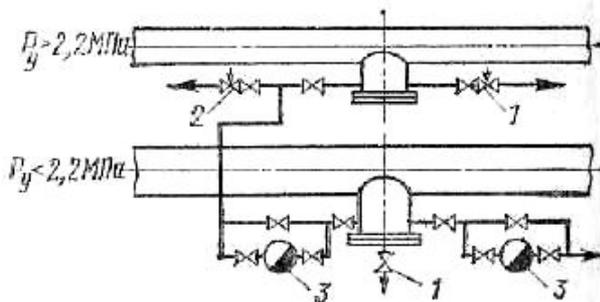


Рис. VIII.21. Схема дренирования паропроводов различного давления:

1 — пусковая продувка; 2 — контрольная продувка; 3 — конденсатоотводчик

Постоянные дренажи используют при транспорте насыщенного пара, а также на паропроводах перегретого пара при резко переменном расходе. Постоянные дренажи обычно совмещают с пусковыми, размещенными в нижних точках паропровода, и устраивают со сбором и возвратом конденсата.

При надземной прокладке паропроводов отвод конденсата осуществляется в конденсатопроводы через конденсационные горшки, которые утепляют в специальных ящиках, установленных на эстакаде или на земле. При подземной прокладке для отвода конденсата чаще применяют подпорные шайбы.

При совместной прокладке паропроводов нескольких параметров дренирование производят в один сборный конденсатоотвод (рис. VIII.21), причем дренирование паропроводов с повышенными параметрами осуществляется в карман паропровода с пониженными параметрами пара. Такая схема дренирования позволяет уменьшить общий отвод конденсата в результате частичного испарения конденсата повышенных параметров в паропроводе низкого давления.

## § IX.6. НАГРУЗКИ НА ОПОРЫ

Подвижные опоры трубопроводов передают на несущие строительные конструкции в основном вертикальную нагрузку. Величина осевых горизонтальных усилий от трения опорных поверхностей зависит от диаметра трубопровода и конструкции опоры.

Вертикальная нагрузка на все виды подвижных и неподвижных опор определяется по удельной нагрузке теплопровода в рабочем состоянии

$$P_{\text{в}} = ql, \quad (\text{IX.4})$$

Где  $q$  — удельная нагрузка, определяемая по формуле (VIII.8), Н/м;  $l$  — расстояние между подвижными опорами, м.

Горизонтальная реакция подвижной опоры скользящего типа определяется равенством

$$P_{\text{г}} = P_{\text{в}}\mu. \quad (\text{IX.5})$$

Коэффициенты трения скольжения  $\mu$  принимаются равными. 0,2 — сталь по стали; 0,6 — сталь по бетону. Горизонтальная осевая реакция катковых, роликовых, шариковых и подвесных опор с достаточной точностью может быть найдена по формуле (IX.5) при коэффициенте трения  $\mu=0,1$ .

Осевые горизонтальные усилия, передаваемые неподвижными опорами на строительные опорные конструкции, складываются из реакций трения подвижных опор, реакций компенсирующих устройств и неуравновешенных сил внутреннего давления. Реакции трения подвижных опор, передаваемые на неподвижные опоры, определяют по формуле

$$P_{\text{тр}} = P_{\text{г}}n_0, \quad (\text{IX.6})$$

где  $n_0$  — число подвижных опор между неподвижными опорами.

При компенсации температурных удлинений П-образными и S-образными компенсаторами в формуле (IX.6) принимается число подвижных опор от неподвижной опоры до компенсирующего устройства, так как (см. рис. VIII,12) реакции трения подвижных опор, размещенных по другую сторону от компенсатора, передаются на другую неподвижную опору.

Реакции неуравновешенных сил внутреннего давления являются результатом давления теплоносителя на внутреннее поперечное сечение трубы. Эти реакции возникают на поворотах, когда торцевое сечение трубы перекрывается отводом; в неуравновешенных сальниковых компенсаторах и переходах диаметров труб, когда давление теплоносителя передается на кольцевое сечение трубы, определяемое разностью сечений труб большого и малого диаметров. Наибольшие осевые усилия от внутреннего давления возникают при полностью закрытой арматуре, когда с обеих ее сторон устанавливаются разные давления.

Расчет осевых усилий от внутреннего давления производят по формуле

$$P_{вд} = P_{раб} (f_1 - f_2), \quad (IX.7)$$

где  $P_{раб}$  — рабочее давление теплоносителя,  $11а, J_1, J_2$  — большее и меньшее внутреннее сечение трубы,  $м^2$ . На поворотах труб на  $90^\circ$  и при закрытых задвижках  $f_2 = 0$ .

На каждую неподвижную опору осевые усилия действуют слева и справа (см. рис. VIII.12). В зависимости от направления реакций усилия частично уравниваются или суммируются. Неподвижные опоры, воспринимающие частично уравновешенные горизонтальные осевые усилия, называются *разгруженными*. Разгруженные неподвижные опоры размещаются между смежными прямолинейными участками трубопроводов, в связи с чем получили и другое название — *промежуточные*. Подушки или стойки, на которых закрепляются эти неподвижные опоры, соответственно называются разгруженными или промежуточными (см. рис. IX. 17, поз. 7). На неподвижные опоры, размещенные на поворотах трубопроводов или перед заглушкой, горизонтальные усилия, действующие с одной стороны, не уравниваются усилиями с другой стороны опоры. Такие неподвижные опоры называют *неразгруженными* или *концевыми*, соответственно называются подушки и стойки — неразгруженные или концевые (см. рис. IX.17, поз. 3).

В общем случае результирующая горизонтальная осевая нагрузка, действующая на неразгруженную концевую неподвижную опору, представляет сумму

$$N_k = P_{тр} + P_{вд} + P_k, \quad (IX.8)$$

где  $p_k$  — реакция трения в сальниковом компенсаторе или распорного усилия гибкого компенсатора.

Результирующая реакция, действующая на разгруженную промежуточную неподвижную опору, определяется суммой

$$N_n = \Delta P_{\text{тр}} + P_{\text{вд}} + \Delta P_{\text{к}}, \quad (\text{IX.9})$$

где  $\Delta P_{\text{тр}}$ ,  $\Delta P_{\text{к}}$  — разность реакции трения подвижных опор и компенсирующих устройств, действующих слева и справа на неподвижную опору.

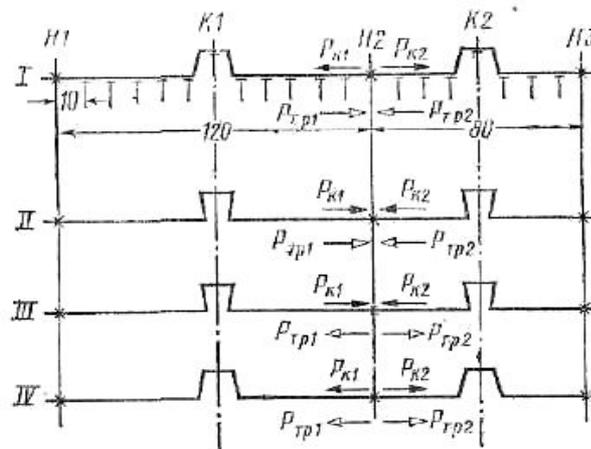


Рис. IX.25. Схема действия сил на промежуточную неподвижную опору при различных режимах работы трубопровода:

*I* — начало нагревания; *II* — конец нагревания;  
*III* — начало охлаждения; *IV* — конец охлаждения

При определении горизонтальных осевых нагрузок на промежуточные неподвижные опоры учитывают все режимы работы трубопровода в процессе нагревания от холодного до рабочего состояний и в процессе охлаждения от рабочего до холодного состояний. Это объясняется тем, что силы трения подвижных опор и упругой деформации гибких компенсирующих устройств при нагревании и охлаждении трубопровода меняют свое направление, поэтому горизонтальные осевые нагрузки на опору определяются для каждого режима работы трубопровода. При этом силы, действующие на неподвижную опору в одном направлении, складываются, а затем из большей суммы сил вычитают меньшую. Учитывая возможные отклонения от расчетных величин, меньшие суммы сил трения и упругой деформации вычитаются с коэффициентом поправки 0,7, который создает запас прочности неподвижной опоры. Если суммы сил слева и справа от неподвижной опоры одинаковы, то результирующая реакция

принимается по одной из суммы сил с коэффициентом поправки 0,3. По данным расчетов строятся эпюры действующих сил для каждого режима работы трубопровода. В качестве расчетных нагрузок на неподвижную опору принимается наибольшая из полученных четырех результатов.

**Пример.** Определить расчетную нагрузку на промежуточную неподвижную опору №2 (рис. IX.25) при следующих данных: удельная нагрузка трубопровода в рабочем состоянии 50 Н/м; усилие компенсатора  $K_1$  в состоянии предварительной растяжки и в рабочем состоянии  $P_{к1}=5000$  Н; усилие компенсатора  $K_2$  в состоянии предварительной растяжки и в рабочем состоянии  $P_{к2}=4000$  Н.

**Решение.** Силы трения подвижных опор определим по формуле (IX.6): на участке между неподвижными опорами Н1, Н2

$$P_{тр1} = \mu q l n_{01} = 0,3 \cdot 50 \cdot 10 \cdot 5 = 750 \text{ Н};$$

на участке между неподвижными опорами Н2, Н3

$$P_{тр2} = \mu q l n_{02} = 0,3 \cdot 50 \cdot 10 \cdot 3 = 450 \text{ Н},$$

где  $l = 10$  м;  $n_{01}, n_{02}$  — число опор слева и справа от неподвижной опоры (приняты из рис. IX.25).

*I режим*, соответствующий трубопроводу в холодном состоянии. Так как усилия, действующие в левую сторону ( $P_{к1} + P_{тр2} = 5000 + 450 = 5450$  Н), больше усилий, направленных вправо ( $P_{к2} + P_{тр1} = 4000 + 750 = 4750$  Н), то результирующая реакция на неподвижную опору определится из равенства

$$N_{н1} = P_{к1} + P_{тр2} - 0,7 (P_{к2} + P_{тр1}) = 2125 \text{ Н}.$$

*II режим*, соответствующий трубопроводу в рабочем состоянии. Усилия, действующие вправо, больше усилий, действующих в обратном направлении, поэтому результирующая реакция на неподвижную опору составит

$$N_{н1} = P_{к1} + P_{тр1} - 0,7 (P_{к2} + P_{тр2}) = 2635 \text{ Н}.$$

*III режим.* С началом охлаждения трубопровода реакции трения подвижных опор изменяют направления, препятствуя сокращению величины температурного удлинения трубопровода. По сумме действующих сил вправо и влево устанавливаем расчетную зависимость

$$N_{н1} = P_{к1} + P_{тр2} - 0,7 (P_{к2} + P_{тр1}) = 2125 \text{ Н}.$$

*IV режим.* С возникновением предварительного растяжения компенсаторов направление их усилий изменится, поэтому расчетная нагрузка на опору составит

$$N_{II, IV} = P_{K1} + P_{TP1} - 0.7 (P_{K2} + P_{TP2}) = 2635 \text{ Н.}$$

Таким образом, для рассматриваемой схемы трубопровода режимы II и IV отвечают наиболее нагруженным состояниям неподвижных опор. Другие часто встречающиеся при проектировании расчетные схемы трубопроводов к методы их решения представлены в справочной литературе [28].