МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра теплоэнергетики

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

для лабораторных работ по расчету теплотехнических характеристик участков неизолированного теплопровода

по дисциплине Б3.В7 **«Централизованное теплоснабжение»**
для студентов направления подготовки 270800 «Строительство»
профиля «Теплогазоснабжение и вентиляция»

КАЗАНЬ
2013

Составители: Ахмерова Г.М, Ланцов А.Е., Медведева Г.А., Крайнов Д.В.

УДК 697.34

ББК 38.76

А95 Методические указания для лабораторных работ по расчету теплотехнических характеристик участков неизолированного теплопровода. по дисциплине Б3.В7 «Централизованное теплоснабжение» для студентов направления подготовки 270800 «Строительство» профиля «Теплогазоснабжение и вентиляция». Сост.: Г.М. Ахмерова, А.Е. Ланцов, Г.А. Медведева, Д.В. Крайнов, Казань: КГАСУ, 2013. – 30 с.

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Казанского государственного архитектурно-строительного университета.

В методических указаниях дана методика выполнения лабораторных работ по расчету теплотехнических характеристик участков неизолированного теплопровода.

Методические указания предназначены для студентов профиля «Теплогазоснабжение и вентиляция» направления подготовки 270800 «Строительство».

Табл. 4, илл. 12, библиогр. 12 наимен.

Рецензент: профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции Казанского государственного архитектурно-строительного университета, к.т.н. **Давыдов А.П.**

УДК 697.34

© Казанский государственный архитектурно-строительный университет, 2013

© Ахмерова Г.М, Ланцов А.Е., Медведева Г.А., Крайнов Д.В, 2013

Содержание

Описание лабораторного стенда и принципы его работы 4
Теоретические обоснования 6
Лабораторная работа №1 23
Цель работы. 23
Основные положения. 23
Контрольные вопросы. 24
Лабораторная работа №2 25
Цель работы. 25
Основные положения. 25
Контрольные вопросы. 26
Лабораторная работа №3 27
Цель работы. 27
Основные положения. 27
Контрольные вопросы. 28
Литература 29

Описание лабораторного стенда и принципы его работы

Стенд представляет собой систему неизолированных, жестко соединенных между собой и имеющих многочисленные изгибы и повороты участков трубопроводов, закрепленных в неподвижных и на свободных опорах. На участках, необходимых для измерения различных величин теплоносителей, установлены: компенсирующие устройства, термометры, манометры, расходомер, фильтры, микрометры и другие приборы. Температура воздуха в помещении лаборатории измеряется специальным термометром.

На представленном стенде студенты, при измерении температуры, расхода и давления теплоносителя и состояния стенки трубопровода могут:

– фиксировать величину термической деформации трубопровода;

– определять величину компенсирующей способности П-образного компенсатора;

– выявлять величину потери теплоты в окружающую среду наружной поверхностью трубопровода;

– по тепловым потерям в окружающую среду трубопроводом рассчитать расход теплоносителя без установки расходомера.

При измерении температуры, расхода и давления теплоносителя трубопроводы стенда имеют возможность работать непосредственно от системы горячего водоснабжения корпуса 4 КГАСУ или от источника автономного теплоснабжения – электрического накопительного водонагревателя (см. рис. 1).

Участок трубопровода 1 закреплен в неподвижных опорах НО3 и НО4 так, что при изменении температуры стенки этого участка трубы он может изменять свои размеры только в одном направлении (см, стрелку ←). Эта деформация трубы фиксируется микрометром ММ2.

Для изучения величины термической деформации на прямом участке стенда установлен П-образный компенсатор, а сам трубопровод неподвижно закреплен в опорах НО1 и НО2.

Расчет потерь теплоты наружной поверхностью трубопроводов участка 2 проводится на основании данных о ее замерах (см. рис. 1). По потерям теплоты определяется расход теплоносителя.

Примечание: проверка расчетов расхода теплоносителя по потерям теплоты трубопроводами осуществляется подключением через фильтр Ф расходомера Р (см. рис. 1).

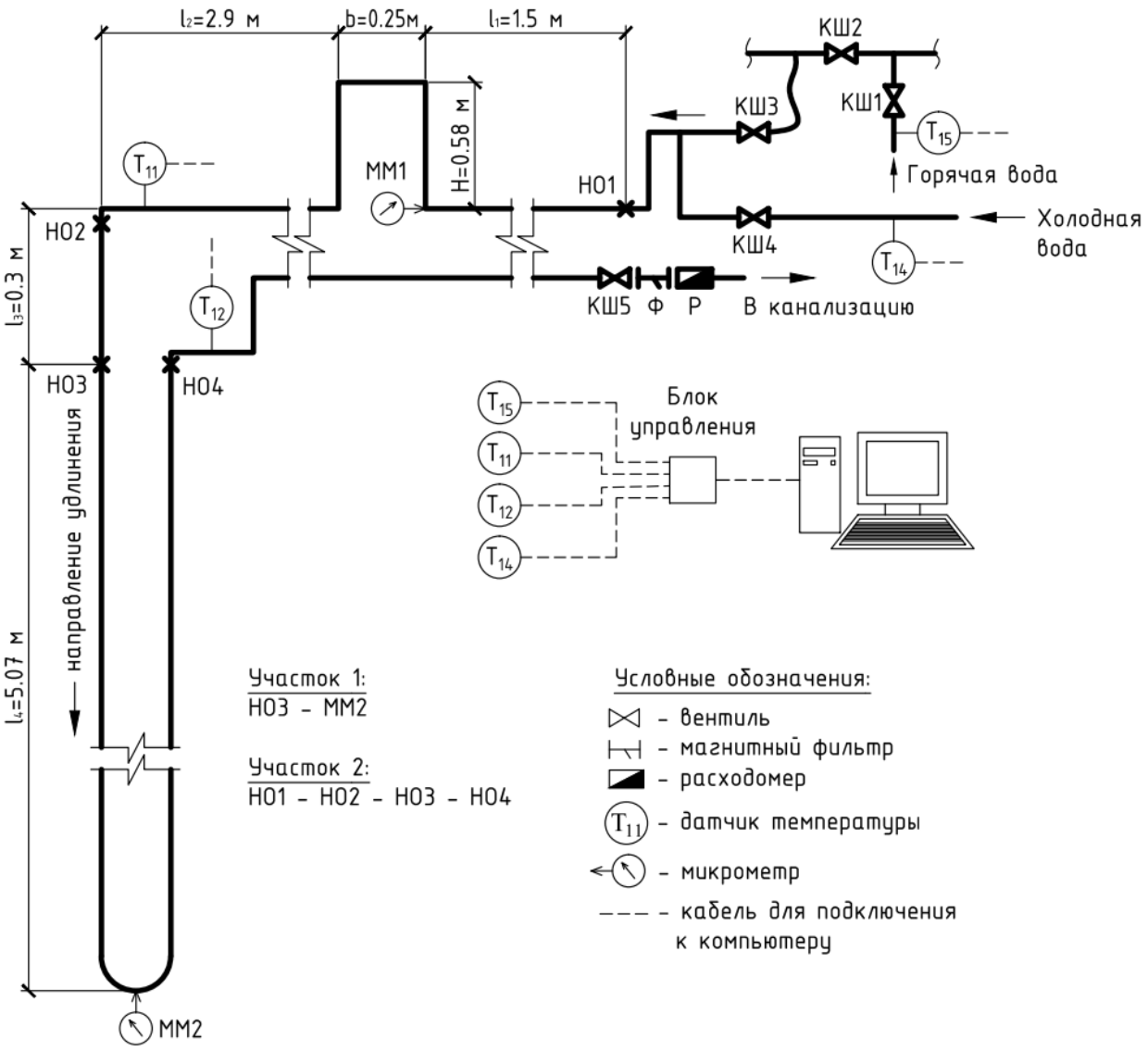

Рис. 1. Схема лабораторного стенда

Теоретические обоснования

В период эксплуатации тепловых сетей, под воздействием внешних и внутренних факторов, в стенке работающего теплопровода возникают различные напряжения (см. рис. 2).

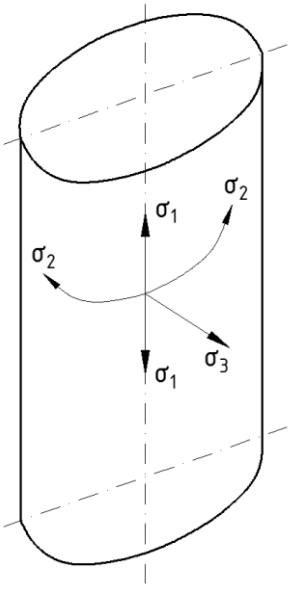

Рис. 2. Напряжения, возникающие в теплопроводах

Напряжение растяжения в «торцевой» плоскости, нормальной к оси трубопровода σ_1. Вектор напряжения направлен по образующей цилиндра.

Напряжение растяжения в осевой плоскости σ_2. Его вектор направлен по касательной к окружности трубы. Напряжение сжатия σ_3. Вектор напряжения сжатия направлен нормально к внутренней поверхности трубы. Напряжение изгиба σ_4. Напряжение изгиба формируется под действием суммарной массы теплопровода (трубопровод, теплоноситель, изоляция). При надземной прокладке к ним присоединяется и действие ветра. При изменении температуры теплоносителя, окружающей среды и стенки трубы в ней возникает напряжение за счет термической деформаций σ_5.

Величина объемного изменения металла стенки трубы незначительна и ею при технических расчетах пренебрегают. Изменения линейных размеров трубопровода под воздействием переменной температуры теплоносителя либо разности температур между стенкой теплопровода и окружающей средой бывают значительны.

В общем случае термическая линейная деформация трубы зависит от:

- геометрической длины участка теплопровода;
- коэффициента линейного расширения металла стенки трубы;
- начальной и конечной температур в процессе нагревания (охлаждения);
- температур стенки трубы и окружающей среды, то есть их разности.

Обычно при расчетах длина трубопровода, температура теплоносителя и окружающей среды заданы. Поэтому все величины напряжений зависят от материала трубопровода, разности температур и расстояния между неподвижными опорами.

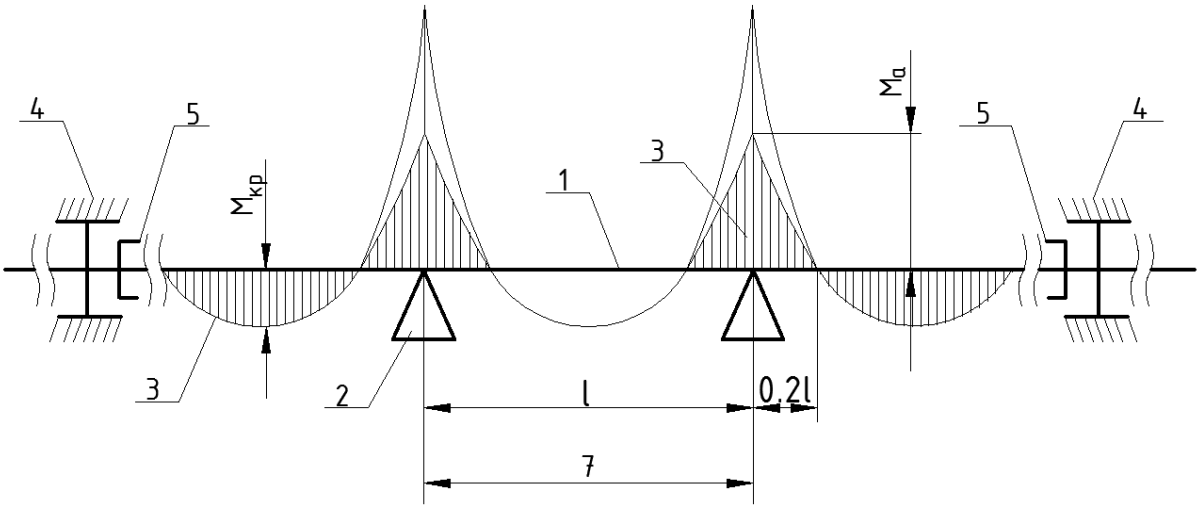

Рис. 3. Эпюры изгибающих моментов

Для обеспечения нормальной работы трубопровод монтируется на свободных и неподвижных опорах, которые воспринимает все возникающие напряжения и передают их на несущие конструкции или грунт (см. рис. 4).

Неподвижные опоры (разгруженные и неразгруженные) (см. рис. 4) – жестко закрепляют определенный участок теплопровода в определенных его точках и воспринимают усилия, которые возникают под действием термической деформации и внутреннего давление в местах ее фиксации.

При определении мест расположения опор необходимо, чтобы все они были нагружены равномерно, но не выше расчетной величины.

Участок трубопровода, неподвижно закрепленный на «мертвых» опорах, является жесткой конструкцией (см. рис. 4). Поэтому при изменении температуры стенки трубы необходимо обеспечить возможность ее свободного перемещения. Для этих целей в тепловых сетях устанавливается специальные компенсирующие конструкции – компенсаторы (см. рис. 5-10).

Рассматривая работу теплопровода при различных тепловых нагрузках, необходимо знать основные положения по ликвидации дополнительных силовых нагрузок на теплопровод.

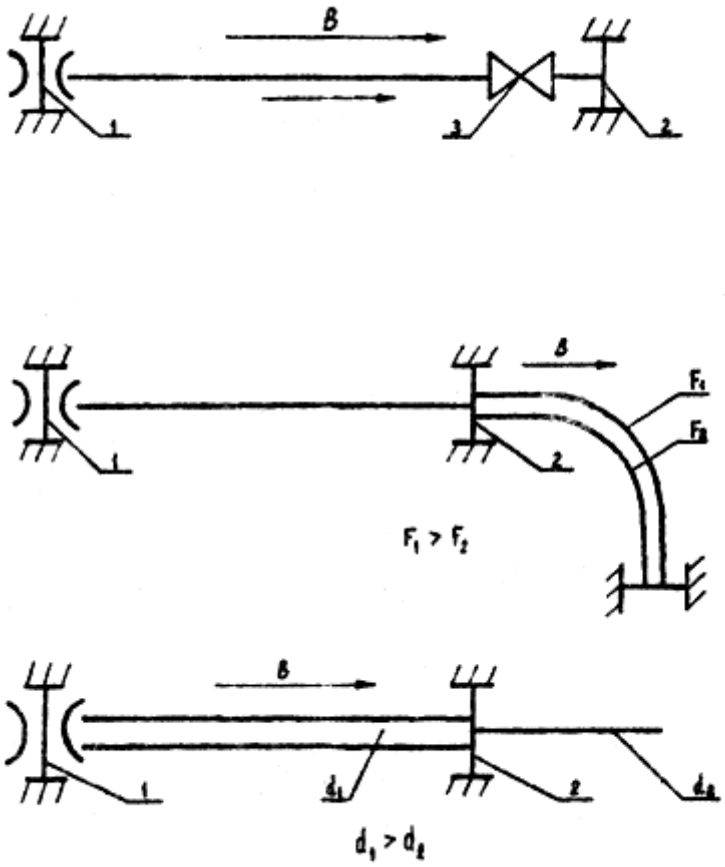

Рис. 4. Схема действия усилий на неподвижные опоры:

1 – разгруженная опора; 2 – неразгруженная опора; 3 – задвижка

Свободные опоры, передающие только массовую нагрузку, могут быть: скользящие, катковые, роликовые, шариковые, подвесные – и другие. (см. рис. 5 и 6). Эти опоры воспринимают массу теплопровода с теплоносителем и изоляцией. Они обеспечивают свободное перемещение трубы при изменении температурных условий ее работы.

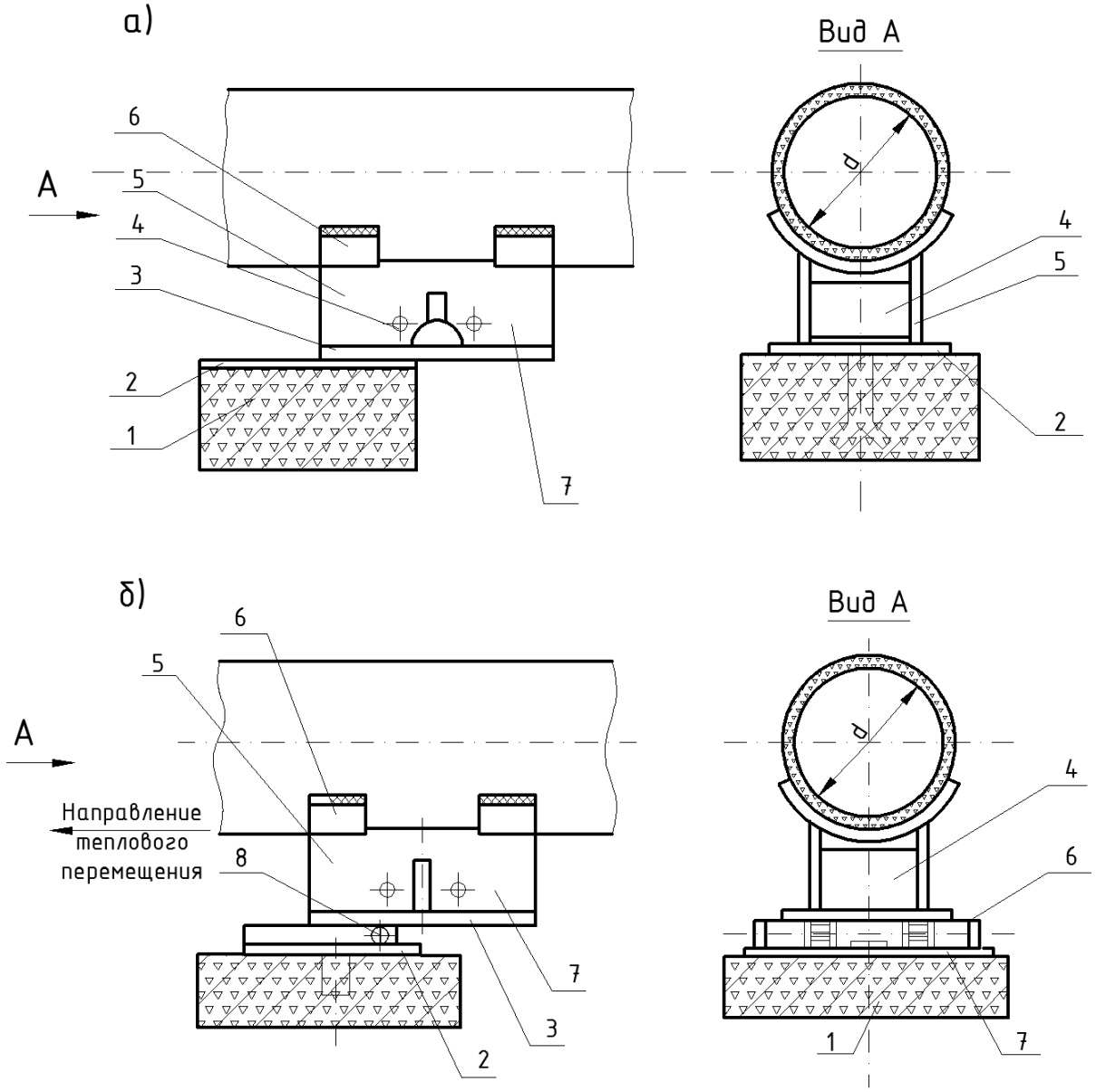

Рис. 5. Опоры подвижные: а) скользящая; б) катковая

1 – лапа; 2 – опорная плита; 3 – основание; 4 – ребро; 5 – ребро боковое; 6 – подушка; 7 – монтажное положения опоры; 8 – каток

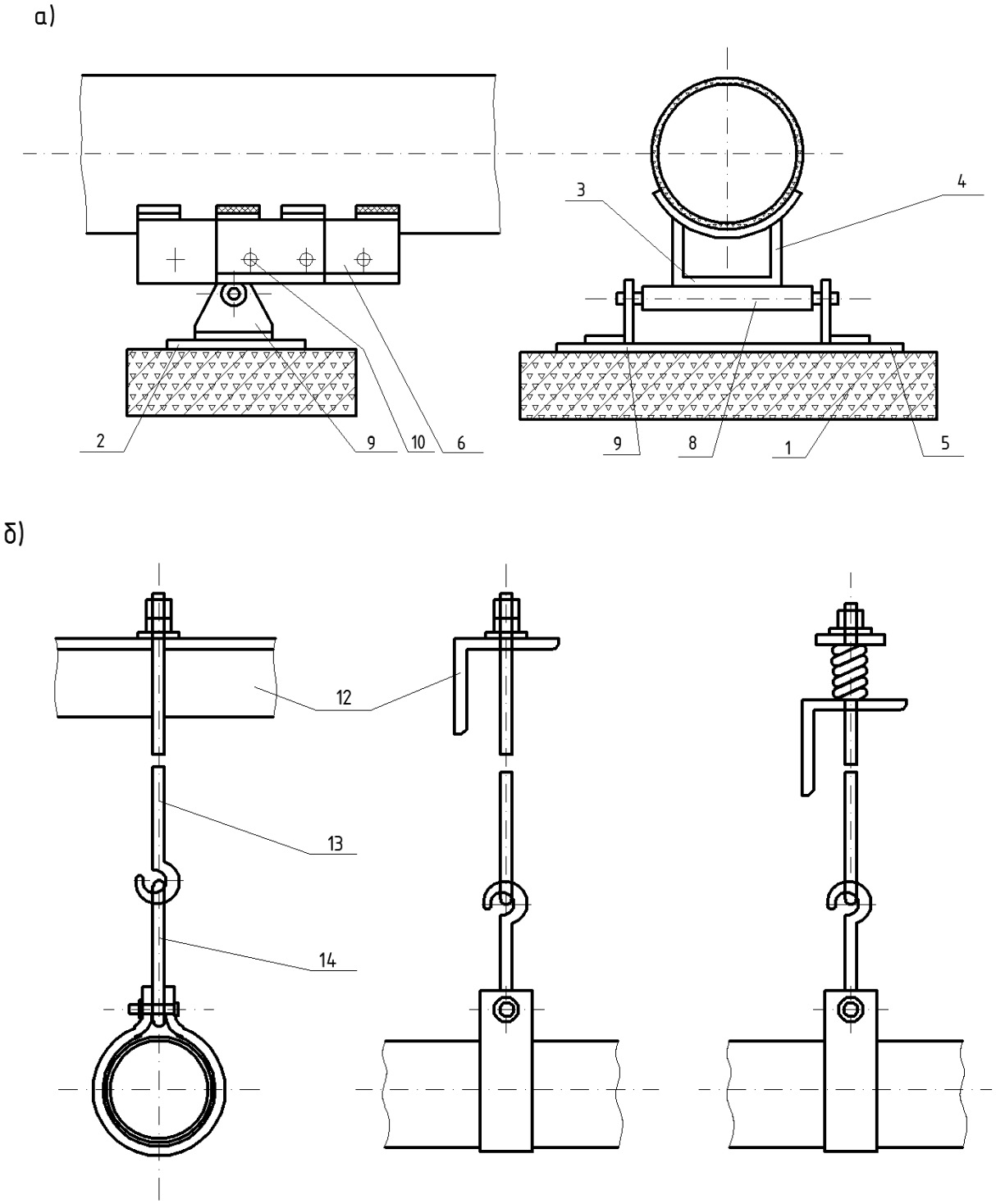

Рис. 6. Опоры подвижные: а) роликовая, б) подвесная

1 – лапа; 2 – опорная плита; 3 – основание; 4 – ребро боковое; 5 – подушка; 6 – монтажное положение опоры; 7 – каток; 8 – ролик; 9 – кронштейн; 10 – отверстия; 12 – кронштейны; 13 – подвесной болт; 14 – тяга

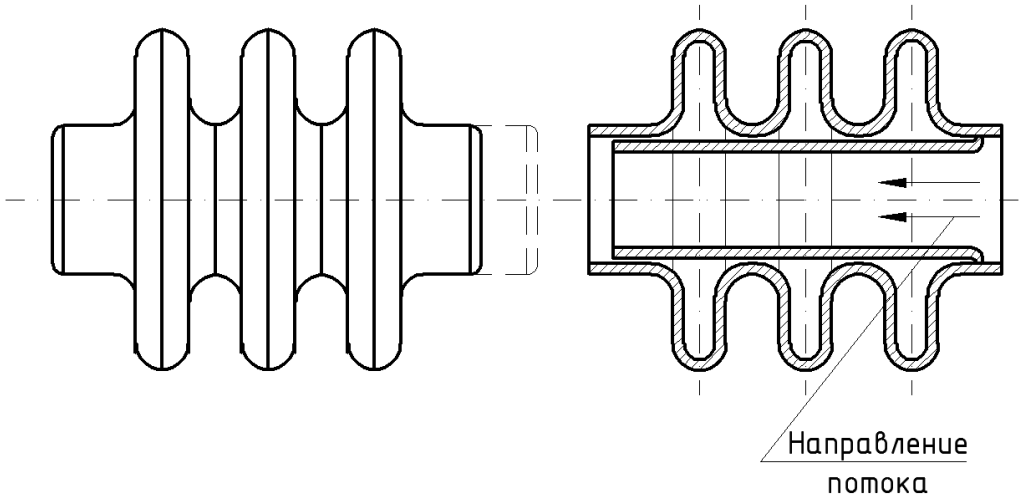

Рис. 7. Линзовый трехволковый компенсатор

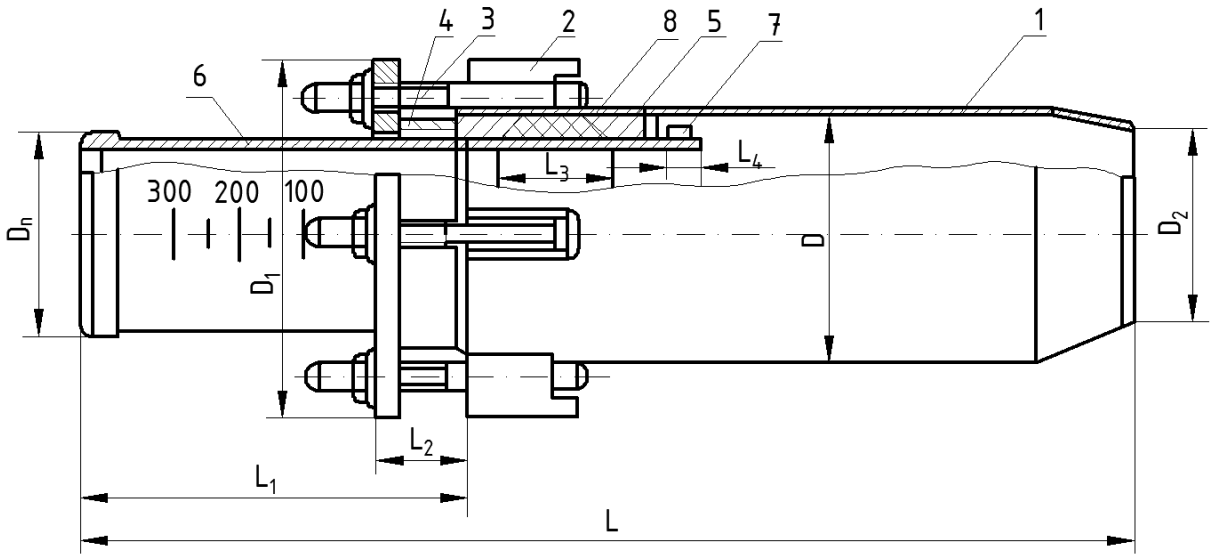

Рис. 8. Односторонний сальниковый компенсатор:

1 – корпус; 2 – упор; 3 – болт; 4 – грундбукса; 5 – контрбукса; 6 – патрубок; 7 – кольцо; 8 – уплотнительная набивка

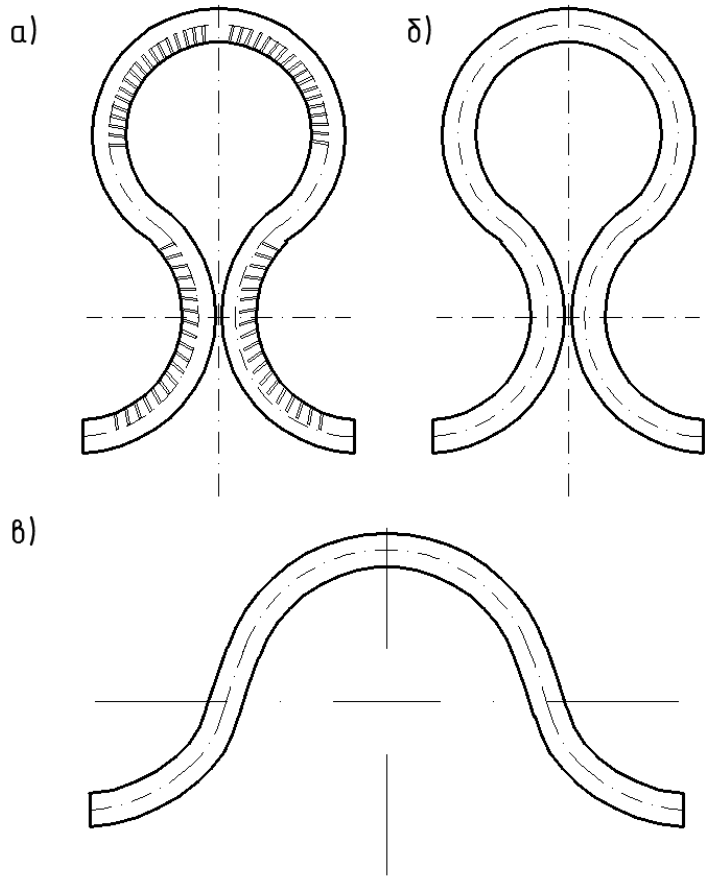

Рис. 9. Типы компенсирующих устройств:

а) лирообразный компенсатор со складками;
б) то же, гладкозагнутый;
в) ω – образный.

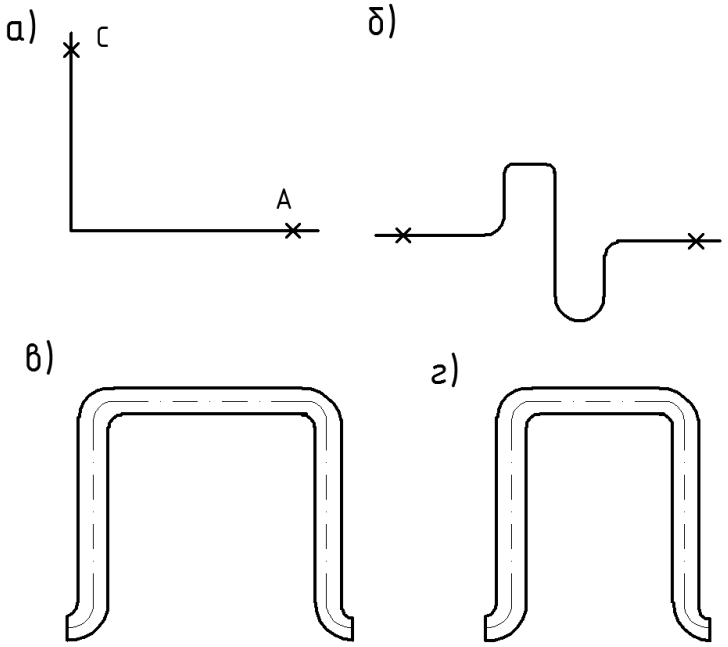

Рис. 10. Типы компенсирующих устройств:

а) естественная компенсация; б) S – образный компенсатор; в) П – образный компенсатор с большой спинкой; г) то же, равносторонний

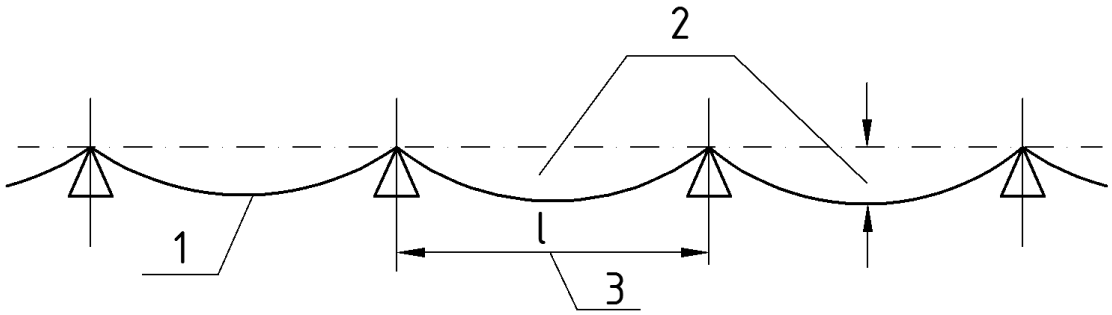

Рис. 11. Стрела прогиба:

1 – трубопровод; 2 – стрела прогиба, 3 – расстояние между неподвижными опорами

Например, компенсация силовых удлинений за счет упругого сжатия прямой трубы, даже при наличии возможности продольного изгиба, из-за большой стрелы прогиба, которая в 10÷15 раз больше удлинения трубы (см. рис. 11), не может быть использована из-за возникающих больших усилий, передаваемых на неподвижные опоры и другие элементы тепловых сетей. Величина этих усилий может принести к деформации или разрушению трубопровода, или к сдвигу мертвой опоры. Поэтому трубопроводы рассматриваются при расчете напряжений и деформаций как многопролетная балка, лежащая на свободных опорах. Независимо от параметров теплоносителя трубопроводы должны быть спроектированы таким образом, чтобы имели возможность свободно удлиняться (при нагреве) или укорачиваться (при снижении температуры теплоносителя).

В некоторых случаях тепловые изменения длин трубопроводов могут компенсироваться за счет эластичности самого трубопровода. Например, при наличии на трассе тепловой сети поворотов и изгибов (см. рис. 10).

Такая компенсация возникающих усилий называется самокомпенсацией. При невозможности проведения самокомпенсации на трубопроводах тепловых сетей устанавливают специальные вставки:

- гибкие вставки из самих трубопроводов, применяются для любых давлений и температур теплоносителя;
- линзовые компенсаторы, применяются для параметров теплоносителя, не превышающих величин давлений 0,7 МПа и температуры не более 300 °С;
- сальниковые компенсаторы, используются до давления 1,6 МПа и температуры теплоносителя не выше 300 °С.

Для увеличения компенсирующей способности компенсаторов производится их холодная растяжка. Величина растяжки зависит от температур теплоносителя и величин напряжений, возникающих при изменении длин трубопровода. Величина удлинений трубопровода может быть рассчитана по формулам или определена по специальным номограммам, приводимым в справочной температуре.

Пример:

Для П-образного компенсатора предварительная растяжка (при температуре теплоносителя до 250 °С) принимается равной 50 % теплового удлинения. В этом случае тепловое удлинение участка трубопровода составит:

$$\Delta l_{расч} = 0{,}5\Delta l\,. \qquad (1)$$

Если П-образный компенсатор расположен не по середине участка трубы между соседними неподвижными опорами, а смещен в сторону одной из этих опор, то величина силы упругой деформации и возникающего напряжения, по сравнению с компенсатором, расположенным по середине участка трубы, увеличивается на 20÷40 %, в зависимости от величины его сдвига.

Растяжка гнутого компенсатора при его изготовлении и монтаже выполняется двумя способами (см. рис. 12) непосредственно на трассе или заводе-изготовителе:

– на теплопроводе, после установки и закрепления неподвижных опор. В том случае, на трубе вырезается участок, равный свободнолежащему компенсатору с добавлением зазора необходимой растяжки. Затем одна сторона компенсатора приваривается к трубе трассы, а его вторая сторона при помощи специального приспособления подтягивается к другому краю трубопровода – и на таком состоянии приваривается. После окончания сварочных работ приспособление снимается;

– на свободно лежащей трубе теплопровода до установки и крепления неподвижных опор.

При таком способе установки компенсатора он на месте изготовления растягивается на необходимую величину, и в таком состоянии в его створ временно вваривается жесткая вставка. Вставка убирается после монтажа теплопровода, установки и закрепления неподвижных опор на трассе.

При использовании сальникового или линзового компенсаторов их установочная длина фиксируется приваркой жестких перемычек между стаканом и корпусом, которые снимаются после монтажа компенсаторов на трассе. Такие компенсаторы устанавливаются около мертвых опор своей неподвижной частью к ней (см. рис. 12).

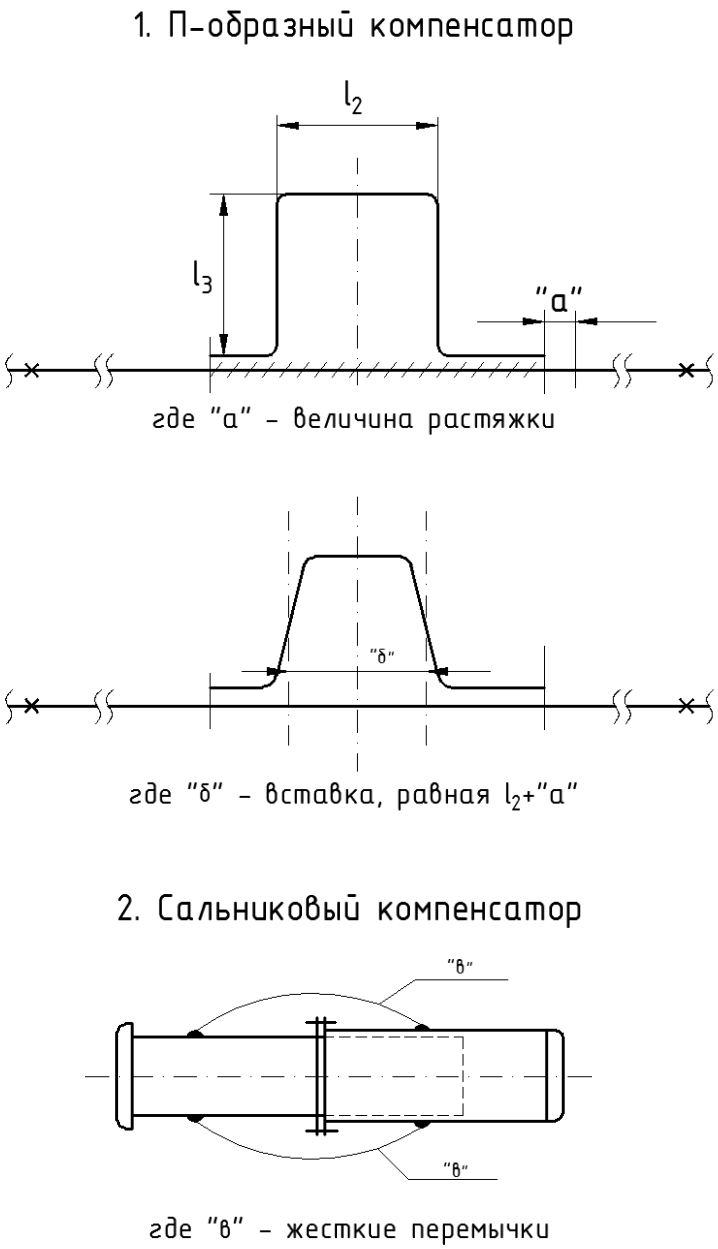

Рис. 12. Схема монтажа компенсаторов

Расчетную компенсирующую способность сальниковых компенсаторов принимают меньше стандартной величины, выбранной по таблицам, на величину *Z*, учитывающую возможное монтажное смещение неподвижных опор и неточное изготовление. Значения *Z* для односторонних сальниковых компенсаторов принимаются равными 40÷50 мм, а для двусторонних 100 мм. (неиспользуемая компенсирующая способность).

Установочную длину сальникового компенсатора в случае неполного использования его компенсирующей способности находят по формуле:

$$L_{уст} = A - Z - \left(L_{расч} - \Delta l\right), \qquad (2)$$

где: *A* – стандартная длина компенсатора (по таблице справочной литературы) при полностью выдвинутом стакане;

Z – величина, учитывающая возможное монтажное смещение неподвижных опор и неточное изготовление, мм;
$L_{расч}$ – расчетная компенсирующая способность компенсатора (свободный ход стакана), мм;
Δl – величина теплового удлинения участка теплопровода, мм.

Монтажная длина сальникового компенсатора $L_м$ определяется с учетом температуры наружного воздуха при которой производится монтаж теплопровода по формуле:

$$L_м = L_{уст} - 0{,}0125\left(t_м - t_о\right) \cdot l, \qquad (3)$$

где: $t_м$ – температура наружного воздуха при монтаже, °С;
$t_о$ – расчетная температура наружного воздуха для отопления, °С;
l – длина рассматриваемого участка, м.

По компенсирующей способности компенсаторы разделяются на осевые и радиальные. Осевые компенсаторы компенсируют только продольное изменение размеров трубы. К таким компенсаторам относятся сальниковые и сильфонные (линзовые). Сильфонные компенсаторы компенсируют и незначительные радиальные деформации.

Сальниковые компенсаторы являются наиболее распространенным видом, но требуют пристального внимание как в период монтажа, так и при эксплуатации, так как при незначительных перекосах конструкции в компенсаторе возможно защемление стакана и компенсатор теряет свои свойства. Поэтому сальниковые компенсаторы устанавливается только на прямолинейный участках трубопровода.

К радиальным компенсаторам относятся такие, которые изготовляются из различных конфигураций и вставок труб: П-, S-, омега-, лирообразные. Радиальные компенсаторы компенсируют как осевую, так и радиальную деформацию труб (см. рис. 9-10).

Для обеспечения необходимой компенсации по трассе участок трубопровода специально закрепляется между неподвижными опорами. Допустимое расстояние между опорами определяется из условий прочности и допустимой стрелы прогиба трубы на середине пролета (см. рис. 11).

Величину допустимого расстояния между неподвижными опорами можно определить как:

$$l = \sqrt{\frac{12\sigma_{изг} \cdot W}{q}}, \qquad (4)$$

где: $\sigma_{изг}$ – допустимое изгибающее напряжение, Па;
W – момент сопротивления трубы, м^3;
q – полная удельная нагрузка теплопровода на один метр длины, Н/м.

На лабораторной установке применен гнутый П-образный компенсатор, что упрощает проведение лабораторных занятий. Недостатком таких компенсаторов является их повышенное гидравлические сопротивление и большие габариты. Имеющиеся конструкции осевых компенсаторов воспринимают удлинение за счет телескопических элементов или за счет упругого удлинения пружинящих вставок.

Компенсаторы изготавливаются с гнутыми отводами с радиусом изгиба $R=(3\div4)d_н$, а также со сваренными отводами (из сегментов) и с крутозагнутыми штампованными отводами. Широко применяются компенсаторы со складчатыми (полурифлеными) отводами, которые имеют на 20 % более высокую компенсирующую способность, чем гладкие отводы.

Компенсирующая способность радиального компенсатора, $\Delta l_к$, м, определяется по формуле:

$$\Delta l_к = \frac{\sigma \cdot H^2 \left(1 + \sigma \cdot \frac{b}{H}\right)}{1{,}5E \cdot d_н}, \qquad (5)$$

где: σ – допускаемое изгибающее напряжение компенсатора, МПа (принимаем σ = 100 МПа);
H – вылет компенсатора, м;
b – длина стенки компенсатора, м;
E – модуль продольной упругости, Па (см. таблицу 2);
$d_н$ – наружный диаметр трубопровода, м.

Определим количество компенсаторов, m, шт., которые необходимо установить на участке трубопровода:

$$m = \frac{\Delta l}{\Delta l_к}. \qquad (6)$$

В некоторых случаях теплопровод закрепляют в одной крайней точке, оставляя возможность его перемещения только в одну сторону. Это наглядно продемонстрировано на лабораторном стенке в ауд. 4-116 (см. рис. 1). При изменении длины закрепленного с обеих сторон участка теплопровода НО1-НО2 (рис. 1) возникающее в его станках напряжение, σ, МПа, можно определить по закону Гука:

$$\sigma = E \cdot i = E \cdot \frac{\Delta l}{l} = E \cdot \alpha \cdot \Delta t, \qquad (7)$$

где: E – модуль продольной упругости, МПа;
i – относительное удлинение трубы:

$$i = \frac{\Delta l}{l}; \qquad (8)$$

Δl – величина теплового удлинения участка теплопровода, м;
l – расстояние между неподвижными опорами, м;
α – коэффициент линейного изменения длины, мм/м·°С или 1/°С (табличные данные).
Δt – повышение температуры стенки трубы, °С.

Коэффициент линейного изменения длины с повышением температуры металла увеличивается, а модуль продольной упругости E уменьшается.

Примечание: в пределах температур на лабораторном стенде (от +10°С до +100 °С) имеем следующие характеристики для стали: $\alpha=1{,}2\cdot10^{-2}$ мм/м·°С, $E=2{,}0\cdot10^5$ МПа. Следовательно, для стали $\sigma = 2{,}35\Delta t$ МПа ($\sigma = 24\Delta t$ кгс/см^2).

Величина полного удлинения трубопровода при изменении температуры его стенки, Δl, мм, равна:

$$\Delta l = \alpha \cdot l \cdot \left(t_н - t_к\right), \tag{9}$$

где: α – коэффициент линейного изменения длины, мм/м·°С или 1/°С (табличные данные). Для стальных трубопроводов среднее значение этого коэффициента равно $\alpha_{ср}$=1,2·10^{-2}, мм/м·°С или 1,2·10^{-5} 1/°С, т.е. для углеродистой стали 1 метр трубы, при нагреве на 100 °С, удлиняется на 1,2мм;

$t_н$ – температура стенки трубы перед началом нагрева, °С;

$t_к$ – температура стенки трубы в конце процесса нагрева, °С.

Расчетное тепловое удлинение трубопроводов, ΔX, мм, для определения размеров гнутых компенсаторов следует определять как:

$$\Delta X = \varepsilon \cdot \Delta l, \tag{10}$$

где: ε – коэффициент, учитывающий релаксацию компенсационных напряжений и предварительную растяжку гнутых компенсаторов. При температуре теплоносителя до 250 °С она равна 50 % полного теплового удлинения трубы.

Силу, которая действовала бы на защемляющие конструкции, P, Н, можно определить как:

$$P = \sigma \cdot f_{ст} = E \cdot i \cdot f_{ст}, \tag{11}$$

где: $f_{ст}$ – площадь поперечного сечения стенки трубы, м^2;

σ – допускаемое напряжение, МПа. Для стали σ=2,35($t_м - t_о$).

В связи с тем, что от расстояния между свободными опорами зависит величина изгибающего напряжения, необходимо знать допустимую величину стрелы прогиба, связанную с расстоянием между свободными опорами. Максимальный изгибающий момент в многопролетный балке возникает на самой опоре, поэтому необходимо определение всех составляющих нагрузок.

Максимальный изгибающий момент, M, Н·м, равен:

$$M = \frac{g \cdot l^2}{12}, \tag{12}$$

где: g – удельная нагрузка, Н/м;

l – расстояние между соседними свободными опорами, м.

Удельная нагрузка, g, Н/м, равна:

$$g = \sqrt{g_в^2 + g_г^2}, \tag{13}$$

где: $g_в$ – вертикальная составляющая, учитывающая полную массу теплопровода с теплоносителем и всей изоляционной конструкцией, Н/м;

$g_г$ – горизонтальная составляющая нагрузки, учитывающая ветровое усилие при надземной прокладке теплопровода, Н/м.

Изгибающий момент, возникающий в середине пролета между соседними свободными опорами равен половине максимального изгибающего момента.

Необходимо иметь в виду, что при монтаже теплопровода на расстоянии равном 0,2l от опоры изгибающий момент равен нулю.

Следовательно, все поперечные швы желательно сваривать в этих сечениях, так как они имеют уменьшенную прочность.

Допустимую стрелу прогиба, y, м, можно определить как:

$$y = \frac{g \cdot l^4}{384E \cdot I}, \tag{14}$$

где: E – модуль продольной упругости, Па (для стали $E = 2 \cdot 10^5$ МПа);
I – экваториальный момент инерции трубы, м^4:

$$I = 0,05\left(d_н^4 - d_{вн}^4\right). \tag{15}$$

Момент сопротивления трубы, W, м, равен:

$$W = 0,1\frac{d_н^4 - d_{вн}^4}{d_н}. \tag{16}$$

В период работы теплопровода с повышенными температурами всегда имеются потери теплоты в окружающую среду. Чем хуже тепловая изоляция, тем больше эти потери. Однако, в некоторых случаях можно достаточно точно определить по тепловым потерям и расход теплоносителя.

Известно несколько методов намерения расходов теплоносителя. Однако общепринятые методы определения расходов (скоростной, дроссельный и весовой) требуют разрез теплопроводов и введение в поток жидкости специальных устройств, которые будут в дальнейшем нарушать гидродинамику потока жидкости и тем самым искажать данные о параметрах жидкости на измеряемом участке.

Задача по определению расходов воды на отдельных участках трубопровода еще более осложняется, если расходы на этих участках невелики.

Одним из наиболее простых методов определения незначительных расходов, при малых скоростях движения жидкости, является метод их определения по тепловым потерям теплопровода, по которому протекает теплоноситель.

Поскольку падение температуры воды на выбранном участке теплопровода будет соответствовать падению температуры на поверхности трубы, то разность температур теплоносителя, Δt, °С, в начале и конце теплопровода, можно заменить легко поддающейся измерению разностей температур поверхности трубы в начале и конце участка путем установки датчиков температур.

Теплоотдача поверхности трубы на опытном участке в окружающую среду будет соответствовать количеству теплоты потерянной теплоносителем при его остывании на Δt, °С, а по количеству потерянной теплоты можно определить расход теплоносителя на участке. Коэффициент теплоотдачи в окружающую среду зависит от величины потерь конвекцией и излучением.

В лабораторных условиях, при полном отсутствии тепловой изоляции эти потери теплоты значительны. Они зависят от величины наружной поверхности трубы, коэффициента теплоотдачи поверхностью и разности температур между температурой стенки трубы и температурой воздуха в помещении.

Коэффициент теплоотдачи, $\alpha_н$, Вт/(м$^2\cdot$°С), представляет из себя сумму коэффициентов теплоотдачи излучением, $\alpha_л$, и конвекцией, $\alpha_к$, то есть:

$$\alpha_н = \alpha_л + \alpha_к . \tag{17}$$

Коэффициент теплоотдачи излучением неизолированных трубопроводов в окружающую среду можно подсчитать по формуле Стефана-Больцмана:

$$\alpha_л = C\frac{\left(\frac{t+273}{100}\right)^4 - \left(\frac{t_в+273}{100}\right)^4}{\left(t-t_в\right)}, \tag{18}$$

где: t – средняя температура поверхности трубы, °С;
$t_в$ – температура воздуха в помещении лаборатории, °С;
C – коэффициент излучения. Для «серых» тел, к которым относятся неизолированные трубопроводы, можно считать равным: C = 3,4÷5,0 Вт/(м$^2\cdot$°С^4).

Коэффициент теплоотдачи конвекцией при горизонтальном расположении трубопроводов, естественной конвекции и невысоких температурах теплоносителя можно определить по формуле Нуссельта:

$$\alpha_к = 1{,}16\cdot\sqrt[4]{\frac{t-t_в}{d_н}}, \tag{19}$$

где: $d_н$ – наружный диаметр трубы, м. $d_н$ = 25,4$\cdot$10^{-3} м.

Для ориентировочной оценки коэффициента теплоотдачи трубопроводов можно воспользоваться формулой:

$$\alpha_н = 10{,}3 + 0{,}052\left(t-t_в\right). \tag{20}$$

Кроме коэффициентов теплоотдачи необходимо знать удельное термическое сопротивление наружной поверхности трубопровода, $R_н$, м$\cdot$°С/Вт, которое равно:

$$R_н = \frac{1}{\pi\cdot d_н\cdot\alpha_н}, \tag{21}$$

где: $\pi\cdot d_н$ – площадь поверхности трубопровода длиной 1 м.

Зная коэффициент теплоотдачи или термическое сопротивление наружной поверхности трубы, можно найти потери теплоты всем трубопроводом.

Удельные тепловые потери теплопровода (тепловые потери 1 метра теплопровода), q, Вт/м, при воздушной прокладке в помещении составляют:

$$q = \frac{\left(t-t_в\right)}{R_н}. \tag{22}$$

В лабораторных условиях с нестандартными опорами потери теплоты в окружающую среду, $Q_н$, Вт, можно определить по формуле:

$$Q_н = \alpha_н \cdot (t - t_в) \cdot \pi \cdot d_н \cdot l, \quad (23)$$

где: $\alpha_н$ – коэффициент теплоотдачи наружной поверхности трубы, Вт/м^2·°С;
t – средняя температура поверхности трубы на участке, °С;
$t_в$ – температура воздуха в помещении, °С;
$d_н$ – наружный диаметр трубы, м ($d_н$ = 25,4·10^{-3} м);
l – длина участка трубы, м.

Потери теплоты можно также найти, зная удельные тепловые потери и длину теплопровода:

$$Q_н = q \cdot l. \quad (24)$$

Для установившегося режима работы трубопровода теплота, поступающая от теплоносителя к его наружной поверхности, в том же количестве отводится в окружающую среду (Q=$Q_н$). Количество теплоты, переносимое теплоносителем, Q, Вт, можно определить по формуле:

$$Q = c \cdot G \cdot (t_н - t_к), \quad (25)$$

где: c – теплоемкость теплоносителя, Дж/кг·°С (c = 4186 Дж/кг·°С);
G – расход теплоносителя, кг/с;
$t_н$ и $t_к$ – температура воды соответственно в начале и в конце участка трубы, °С.

По общим потерям теплоты (формула (23) или (24)) и разности температур между начальной и конечной точкой теплопровода можно найти расход теплоносителя, G, кг/с, как:

$$G = \frac{Q_н}{c \cdot (t_н - t_к)}. \quad (26)$$

Полученное значение сравнивается с показаниями подключенного расходометра:

$$G_р = \frac{P_н - P_к}{\tau} \cdot \rho, \quad (27)$$

где: $P_н$ и $P_к$ – показания расходомера соответственно в начале и в конце периода, соответствующего установившемуся режиму теплоотдачи, м^3;
τ – продолжительность периода установившегося режима теплоотдачи, сек.;
ρ – плотность теплоносителя, кг/м^3. В рамках лабораторной работы можно принять ρ = 1000 кг/м^3.

Примечание: при определении теплотехнических характеристик неизолированного теплопровода необходимо учитывать линейные и местные теплопотери.

Следовательно, к линейным потерям теплоты необходимо добавить местные, возникающие в результате стока теплоты через различные опорные

конструкции (фланцевые соединения, запорную, регулирующую и др. арматуру), которые определяются по формуле:

$$Q = Q_л + Q_м = q \cdot l_{экв} \cdot (1 + \beta), \quad (28)$$

где: $Q_л$ – линейные потери теплоты, Вт;
$Q_м$ – местные потери теплоты, Вт;
β = 1,25 для надземных прокладок.

Линейные потери теплоты рассчитываются по формулам (23) или (24).

Способ определения $Q_м$ основан на использовании эквивалентных длин фланцев, арматуры, опор, тепловые потери которых равновелики тепловым потерям прямых участков труб того же диаметра, то есть:

$$Q_м = q \cdot l_{м\ экв}, \quad (29)$$

где: $l_{экв}$ – суммарная эквивалентная длина всех элементов тепловой сети, определяемая по формуле:

$$l_{экв} = l + l_{м\ экв}, \quad (30)$$

где: l – длина линейных участков трубопровода, м;
$l_{м\ экв.}$ – эквивалентная длина неизолированного трубопровода, соответствующая местным тепловым потерям одного элемента определенного типоразмера при общем количестве этих элементов в пределах данного участка, м. Определяется по справочнику.

При известном количестве и видах элементов тепловой сети потери принимаются по справочной литературе в зависимости от температуры теплоносителя и способа прокладки теплопроводов.

Пример:

В практических расчетах эквивалентную длину для пары неизолированных фланцев можно принимать 8÷10 м изолированного теплопровода того же диаметра и т.д. (см. справочную литературу).

Лабораторная работа №1

Определение удлинения трубопровода под действием повышенных температур

Цель работы.

Определить экспериментальным и расчетным методами удлинение трубопровода при нагревании.

Основные положения.

Экспериментальная часть.

Зная длину петли l и измерив показание микрометра ММ3 от 0 до зафиксированного положения, определяется опытное удлинение трубопровода.

Расчетная часть.

По показаниям термометров T_{11} и T_{12} определяется средняя температура стенки трубы по формуле $(T_{11}+T_{12})/2$. Коэффициент линейного расширения α определяется из таблицы 1. По формуле (9) вычисляется значение Δl.

Таблица 1

Коэффициенты линейного расширения трубных сталей α и модулей повышенных температур

Температура стенки трубы, °С	α, мм/м °С	E, МПа
20	$1{,}18\cdot10^{-2}$	$2{,}05\cdot10^{5}$
100	$1{,}22\cdot10^{-2}$	$1{,}975\cdot10^{5}$
150	$1{,}25\cdot10^{-2}$	$1{,}93\cdot10^{5}$
200	$1{,}28\cdot10^{-2}$	$1{,}875\cdot10^{5}$

Таблица 2

Протокол наблюдений и расчетов

№ п/п	Измеряемая величина	Обо-значе-ние	Ед. изм.	Номера опытов				
				1	2	3	4	5
1	Показания микрометра ММ3	$\Delta l_э$	мм					
2	Температура в начале участка	T_{11}	°С					
3	Температура в конце участка	T_{12}	°С					
4	Температура стенки трубы	t	°С					
5	Коэффициент линейного изменения длины	α	мм/м·°С					
6	Расчетное удлинение трубопровода	$\Delta l_р$	мм					

Для определения максимального удлинения трубы вместо $t_н$ берется расчетная температура воздуха для отопления ($t_о$ = -32 °С для г. Казани), вместо $t_к$ – расчетная температура в подающем трубопроводе системы центрального теплоснабжения ($t_п$ = 150 °С).

Контрольные вопросы.

1. Сформулируйте цель лабораторной работы и поясните, как достигается поставленная цель?
2. Назовите основные узлы экспериментальной установки и укажите их назначение.
3. За счет чего происходит удлинение трубопровода?
4. Какими методами измеряется температура в данной работе?
5. Как измеряется удлинение в данной работе?
6. Какова единица измерения микрометра?
7. В каком направлении происходит удлинение участка трубопровода?
8. Какова расчетная длина удлиняемого трубопровода?
9. Совпадает ли направление удлинения трубопровода с направлением течения жидкости?
10. Зависит ли температурное удлинение от диаметра трубопровода?
11. Что будет происходить с трубопроводом при охлаждении?

Лабораторная работа №2

Определение компенсирующей способности П-образного компенсатора, установленного на ветви II

Цель работы.

Определить необходимое количество П-образных компенсаторов на ветви II.

Основные положения.

Выполняется подготовка стенда к работе.

После стабилизации температуры определяется Δl_1 по показаниям ММ1. Находится общее удлинение, $\Delta l_э$, участка НО1-НО2. По формуле (9) вычисляется значение $\Delta l_р$.

Проверяется компенсирующая способность компенсатора по формуле (5).

Примечание: компенсирующая способность радиального компенсатора проверяется по экспериментальной формуле:

$$\Delta l_к = \frac{\sigma_{изг} \cdot H^2 \left(1 + \sigma \cdot \frac{b_1}{H_2}\right)}{1{,}5E \cdot d_н}.$$

Таблица 3

Протокол наблюдений и расчетов

№ п/п	Измеряемая величина	Обо-значе-ние	Ед. изм.	Номера опытов				
				1	2	3	4	5
1	Показания микрометра ММ2	Δl_1	мм					
2	Общее удлинение участка трубопровода	$\Delta l_э$	мм					
3	Температура в начале участка	T_{15}	°С					
4	Температура в конце участка	T_{11}	°С					
5	Температура стенки трубы	t	°С					
6	Коэффициент линейного изменения длины	α	мм/м·°С					
7	Расчетное удлинение трубопровода	$\Delta l_р$	мм					

Выполняется сравнение полученных данных.

Необходимое количество компенсаторов определяется по формуле (6).

Контрольные вопросы.

1. Сформулируйте цель лабораторной работы и поясните, как достигается поставленная цель?
2. Назовите основные узлы экспериментальной установки и укажите их назначение.
3. Какие виды опор трубопроводов вам известны?
4. Какие типы свободных опор вы знаете?
5. Для чего служат свободные опоры?
6. Где на тепловой сети устанавливаются компенсаторы?
7. Какие виды компенсаторов вы знаете?
8. Как вы понимаете значение «самокомпенсация»?
9. Назовите основные элементы сальникового компенсатора.
10. Для чего необходима предварительная растяжка компенсатора?

Лабораторная работа №3

Определение расхода теплоносителя без установки расходомера

Цель работы.

Определить экспериментальным и расчетным методами расход теплоносителя в сети теплоснабжения.

Основные положения.

Выполняются мероприятия по подготовке стенда к работе.

Необходимое дополнительное оборудование: секундомер.

Расчетным участком теплопровода является Участок 2.

Трубопровод прогревается. При достижении установившегося режима теплоотдачи (постоянство температур T_{15} и T_{12}) выполняется замер показаний расходомера, секундомера, датчиков температур. По истечении 1÷5 мин. закрывается шаровой кран КШЗ, выполняется окончательный замер показаний приборов.

В условиях невысоких температур теплоносителя в лабораторной установке потери теплоты неизолированными трубопроводами определяются из уравнения (формула (23)):

$$Q_н = \alpha_н \cdot \left(\frac{T_{15} + T_{12}}{2} - t_в \right) \cdot \pi \cdot d_н \cdot l .$$

Коэффициент $\alpha_н$ определяется из формул (17)-(19). Для ориентировочной оценки $\alpha_н$ сравнивается с величиной, рассчитанной по формуле (20).

Определение расхода теплоносителя производится по формуле (26).

Кроме этого определяются удельное термическое сопротивление наружной поверхности трубопровода (по формуле (21)) и удельные тепловые потери (по формуле (22)).

Таблица 4

Протокол наблюдений и расчетов

№ п/п	Измеряемая величина	Обо-значе-ние	Ед. изм.	Номера опытов				
				1	2	3	4	5
1	Наружный диаметр трубы	$d_н$	м					
2	Длина участка трубы	l	м					
3	Температура в начале участка	T_{15}	°С					
4	Температура в конце участка	T_{12}	°С					
5	Средняя температура поверхности трубы	t	°С					
6	Температура воздуха в помещении	$t_в$	°С					

продолжение таблицы 4

№ п/п	Измеряемая величина	Обо-значе-ние	Ед. изм.	Номера опытов				
				1	2	3	4	5
7	Коэффициент теплоотдачи конвекцией	$\alpha_к$	Вт/м^2·°С					
8	Коэффициент теплоотдачи конвекцией	$\alpha_л$	Вт/м^2·°С					
9	Коэффициент теплоотдачи наружной поверхности трубы	$\alpha_н$	Вт/м^2·°С					
10	Удельное термическое сопротивление наружной поверхности трубопровода	$R_н$	м·°С/Вт					
11	Удельные тепловые потери теплопровода	q	Вт/м					
12	Потери теплоты в окружающую среду	$Q_н$	Вт					
13	Расчетный расход теплоносителя	G	кг/с					
14	Показания расходомера	P	м^3					
15	Время	τ	сек.					
16	Расход по расходомеру	G_p	кг/с					

Примечание: Значение по расходомеру, как правило, будет иное, так как при расчете не были учтены местные потери теплоты на различные конструктивные элементы сети (арматуру, свободные и мертвые опоры и др.).

Контрольные вопросы.

1. Сформулируйте цель лабораторной работы и поясните, как достигается поставленная цель?
2. Назовите основные узлы экспериментальной установки и укажите их назначение.
3. Дайте определение расхода теплоносителя.
4. В каких единицах измеряется расход воды?
5. Какими приборами можно измерить расход воды?
6. Как определить расход воды с помощью расходомера?
7. Какова связь между расходом воды и переносимым количеством теплоты?
8. Дайте вывод аналитической формулы для расчета расхода.
9. Как вы понимаете значение «установившийся режим теплоотдачи»?
10. Какая связь между расходом, измеряемым в кг/с и м^3/ч?

Литература

1. СНиП 41-02-2003. Тепловые сети. – М.: Госстрой России, 2004. – 49с.
2. Соколов Е. Я. Теплофизика и тепловые сети. М.; Энергоиздат, 1982. – 360 с.
3. Ионин А.А. и др.Теплоснабжение: учебник – М.: Эколит, 2011. – 336с.
4. Манюк В.И. и др. Справочник по наладке и эксплуатации водяных тепловых сетей. – М.: Стройиздат, 1988. – 432 с.
5. Козин В.Е. Лавына Т.А., и др. Теплоснабжение. – М.: Высшая школа, 1980. – 404 с.
6. Ахмерова Г. М., Ланцов А. Е. Методические указания к курсовому и дипломному проектированию дисциплины «Теплоснабжения» для студентов специальности 270109. Часть 1. Казань: КГАСУ, 2012. – 38 с.
7. Ахмерова Г. М., Ланцов А. Е. Методические указания к курсовому и дипломному проектированию дисциплины «Теплоснабжения» для студентов специальности 270109. Часть 2. Казань: КГАСУ, 2012. – 35 с.
8. Баляйкина И.В., Витальев В.П., Громов Н.К. Водяные тепловые сети. – М.: Энергоиздат, 1988. – 376 с.
9. Переверзев В.А., Шумов В.В. Справочник мастера тепловых сетей. - 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр.отд-ние.1987. – 23 с.
10. Щекин Р.В. и др. Справочник по теплоснабжению и вентиляции. 1ч. Отопление и теплоснабжение. Киев: Будивельник, 1976. – 413 с.
11. Теплоснабжение и вентиляция. Курсовое и дипломное проектирование: учеб. пособие для студ.вузов. обуч. По спец. «ТГВ» напр.подготовки дипломир.спец. «Стр-во» / под общ.ред. Б.М.Хрусталева. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: АСВ, 2008. – 784 с.
12. Ахмерова Г.М., Ланцов А.Е. Выбор и расчёт тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей: Учебное пособие. – Казань: КГАСУ, 2010. – 114 с.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

для лабораторных работ
по расчету теплотехнических характеристик участков
неизолированного теплопровода

по дисциплине Б3.В7 **«Централизованное теплоснабжение»**
для студентов направления подготовки 270800 «Строительство»
профиля «Теплогазоснабжение и вентиляция»

Составители: Ахмерова Гузель Мневеровна
Ланцов Александр Евгеньевич
Медведева Галина Александровна
Крайнов Дмитрий Владимирович

Редактор: Рябенкова Г.А.

Редакционно-издательский отдел
Казанского государственного архитектурно-строительного университета

Подписано в печать Формат 60 х 84/16
Заказ № Печать ризографическая Усл. печ. л. 1,875
Тираж 100 экз. Бумага офсетная № I Уч.-изд. л. 1,875

Издательство КГАСУ
420043, Казань, Зелёная, 1.