

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООВОГО РАСЧЕТА ВОДЯНЫХ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ

Тарасевич Е.И.¹

¹ФГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» (СПбГАСУ), Санкт-Петербург, Россия (Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4), e-mail: catia.smirnowa@yandex.ru

Статья посвящена системам теплоснабжения. Система теплоснабжения состоит из одного или нескольких источников тепла, тепловых сетей с тепловой изоляцией и потребителей тепла. В этой системе происходят значительные потери тепла, поэтому очень важно выбрать правильную теплоизоляцию. В данной работе описаны методы теплового расчета систем водяного теплоснабжения, а также представлен состав данного расчета. Приводятся варианты расчета тепловых потерь в зависимости от расположения данных трубопроводов. Рассмотрен расчет толщины тепловой изоляции. Существует очень много видов теплоизоляционных материалов. Следовательно, очень важно выбрать качественные энергосберегающие теплоизоляционные конструкции. Поэтому необходимо правильно рассчитать экономически оптимальную толщину изоляционного слоя. Применение таких теплоизоляционных конструкций, значительно экономит тепловую энергию, стоимость которой растет. Теплоизоляция трубопроводов отопления позволяет снизить теплопотери до минимума.

Ключевые слова: горячая вода, системы централизованного теплоснабжения, тепловая изоляция, тепловой поток, тепловой расчет, тепловые сети, теплопровод, теплопроводность, термическое сопротивление, толщина теплоизоляционного слоя.

FEATURES OF THERMAL CALCULATION IN WATER THERMAL NETWORKS.

Tarasevich E.I.¹

¹ Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPSUACE), Saint-Petersburg, Russia (190005 St. Petersburg, Russia, 2-nd Krasnoarmeiskaya St. 4), e-mail: catia.smirnowa@yandex.ru

The article is devoted to heat supply systems. Heat supply system consists of one or several heat sources: heating networks with thermal insulation and heat consumers. In this system there are considerable heat losses, therefore it is very important to choose the right thermal insulation. This work describes the methods of thermal calculation in heat supply systems, and also there is the composition of this calculation. In this article, there are examples for calculation of heat losses. This calculation depends on where the pipelines are situated. Also the article includes calculation of the thickness of the insulating layer. The kinds of the heat insulation materials are extensive. Hence, it is very important to select the high-quality energy-saving heat insulation design. That's why it is necessary to choose the economically optimum thickness of the insulation layer correctly. The application of such insulating structures, will considerably save thermal energy, the cost of which is growing. Thermal insulation of pipelines in heat supply systems can reduce heat loss to a minimum.

Keywords: Hot water, district heating systems, thermal insulation, heat flow, thermal calculation, thermal networks, pipeline of heat supply system, thermal conductivity, thermal resistance, thickness of the insulating layer.

Существует широкое разнообразие теплоизоляционных материалов, доступных для использования в инженерных системах. Их перечень непрерывно меняется, так как существующие изделия видоизменяются, новые продукты развиваются, а другие постепенно ликвидируются. При выборе материала теплоизоляционной конструкции большое значение имеет указание о назначении тепловой изоляции, главным образом, оно и определяет толщину теплоизоляционного слоя.

Теплоизоляционные конструкции трубопроводов тепловых сетей нужны не только для того, чтобы снизить теплопотери. С помощью тепловой изоляции можно сократить температуру на поверхности трубопроводов, таким образом, обеспечивая безопасную

эксплуатацию инженерной системы. Для выполнения этих условий необходимо произвести тепловой расчет. Такой расчет позволяет вычислить тепловые потери трубопроводов при заданном типе прокладки тепловых сетей с определенной конструкцией тепловой изоляции, и далее по заданным значениям данных тепловых потерь можно определить толщину теплоизоляционных слоев конструкции, а также производятся расчет падения температуры теплоносителя при движении его по теплопроводу и расчет температурного поля вокруг трубопровода.

Цель: рассмотреть тепловой расчет систем теплоснабжения при различных способах прокладки теплопроводов.

Задачи : определить от каких параметров зависит тепловой расчет и рассмотреть термические сопротивления в зависимости от прокладки тепловых сетей.

Описание исходных данных для теплового расчета трубопроводов тепловых сетей

Исходными данными в тепловом расчете являются: температура теплоносителя на входе в рассматриваемый объект, теплопроводность изоляционных материалов и температура окружающей среды, воспринимающей теплотерии от конструкции теплосетей. Температура окружающей среды зависит от типа прокладки инженерных коммуникаций. В общем, прокладку тепловых сетей можно разделить на 2 вида – воздушная и подземная. При воздушной прокладке сетей окружающей средой является воздух, а при подземной массив грунта, в котором проложена сеть.

Конструкции изолированных трубопроводов тепловых сетей состоят из нескольких слоев по толщине, выполненных из различных материалов (см. рис. 1,2).[2]

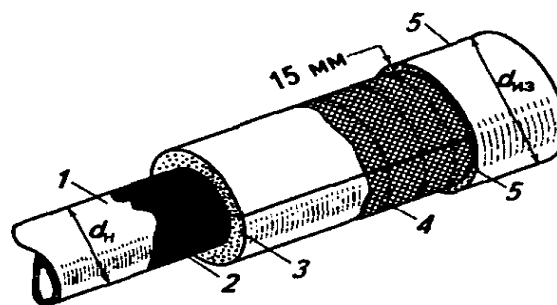


Рис.1. Трубопровод тепловой сети с подвесной теплоизоляционной конструкцией (используется для воздушной прокладки) .

1 – труба ; 2 – антикоррозийное покрытие; 3 – мат из минеральной ваты; 4 – стальная сетка; 5 – асбестоцементная штукатурка

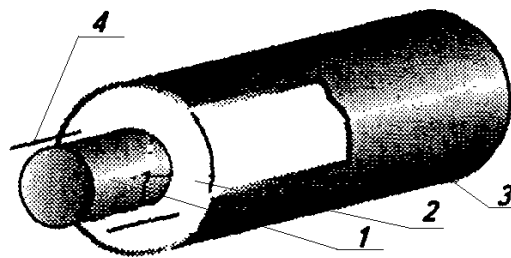


Рис.2. Трубопровод тепловой сети с конструкцией из пенополиуретановой теплоизоляции (используется для подземной прокладки).

1 – труба ; 2 – пенополиуретан; 3 – полиэтиленовая оболочка; 4 – провод системы оперативного дистанционного контроля влажности теплоизоляции (ОДК)

Слоем, прилегающим непосредственно к теплоносителю, является стенка стальной трубы. На наружную поверхность трубы должно наноситься антикоррозионное покрытие, а поверх него — основной изоляционный слой. Поверх основного слоя укладывается покровный слой из металлических листов или пластиков. При этом каждый слой изоляционной конструкции выполняется одной толщины по окружности изолируемой трубы. [1]

Главной задачей теплового расчета теплопроводов всех видов прокладок является выбор теплоизоляционной конструкции, обеспечивающей рациональный минимум тепловых потерь и допустимое падение температуры теплоносителя. В большинстве случаев такие расчеты производят для определения температурного поля вокруг теплопроводов.

При выполнении тепловых расчетов теплопроводов тепловых сетей тепловые потоки определяют через изоляционные слои и поверхности цилиндрической формы, а удельные тепловые потери и термические сопротивления относят к единице длины теплопровода. Для теплоизолированных сетей главное значение имеет термическое сопротивление изоляционного слоя. В тепловом расчете существует два вида термических сопротивлений – сопротивление поверхности и сопротивление слоя.

Исходными величинами для определения термического сопротивления поверхности являются диаметр теплопровода и коэффициент теплоотдачи с поверхности. Коэффициенты теплоотдачи от теплоносителя к внутренней поверхности теплопровода очень высокие, следовательно, получаются очень малые значения термического сопротивления внутренней поверхности теплопровода, которыми можно пренебречь.

В тепловом расчете большое значение имеют слои с большим термическим сопротивлением. Данные слои – тепловая изоляция, стенка канала и массив грунта. Таким образом, при практических расчетах термическое сопротивление металлической стенки рабочей трубы можно не учитывать.

Тепловое поле при подземной прокладке теплопроводов

Когда трубопровод тепловой сети прокладывают в грунте, он представляет собой определенное термическое сопротивление. В данном случае тепловой поток направлен от теплоносителя к поверхности земли и затем в окружающую среду. На рисунке 3 представлен трубопровод тепловой сети с изоляцией при прокладке в грунте.

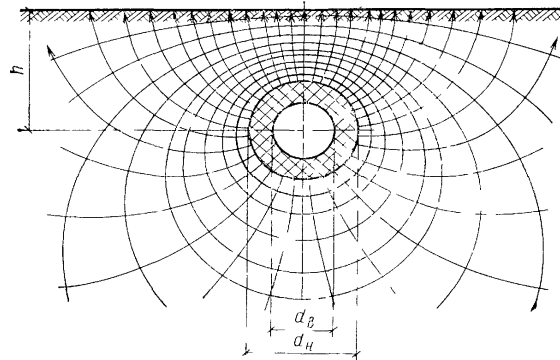


Рис.3 . Поперечный разрез теплопровода , проложенного бесканально в грунте

Здесь показаны изотермы, в виде окружностей, “центры которых с уменьшением температуры смещаются вниз от поверхности земли. Линии теплового потока симметричны относительно вертикальной плоскости, проходящей через ось трубопровода”, они начинаются от поверхности теплопровода , далее выходят из грунта по нормали к нему.[3] Для того, чтобы определить термическое сопротивление грунта используют метод «источника и стока» (принцип наложения температурных полей).

Для нахождения тепловых потерь параллельных трубопроводов при бесканальной прокладке тепловых сетей, используют принцип наложения температурных полей, создаваемых теплопроводами по отдельности.

В массиве неограниченного пространства грунта (объем бесконечной протяженности в направлении всех измерений) действуют сосредоточенные линейные (положительные и отрицательные) источники тепла (см. рис. 4).

Положительные источники тепла обозначены “+Q”, а отрицательные “стоки” тепла – через “-Q”. В сравнении с длиной неограниченного массива, источник и “сток” расположены очень близко по отношению друг к другу. Следовательно расстояние между источником и “стоком” тепла представляет собой линию наименьшего термического сопротивления. Поэтому все тепло, выделяемое источником, полностью поглощается “стоком”.

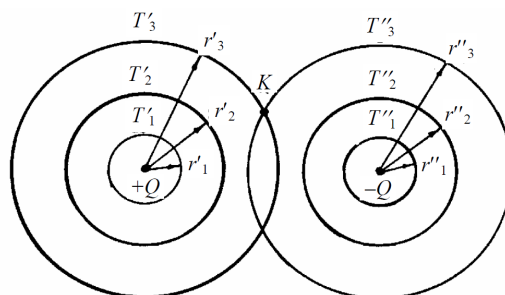


Рис. 4. Расположение источника и стока тепла:

К – точка наложения изотерм; +Q – положительные источники тепла; –Q – отрицательные “стоки” тепла; $T_1', T_2', T_3', T_1'', T_2'', T_3''$ – изотермы; $r_1', r_2', r_3', r_1'', r_2'', r_3''$ – радиусы окружностей изотерм

Предполагается, что тепло от цилиндрического трубопровода теплосети передается через грунт не в окружающую среду, а забирается отрицательным тепловым источником. Условно полагают, что источники и “стоки” не мешают друг другу при одновременном действии, а результирующее температурное поле получается путем сложения температурных полей, возбуждаемых в теле отдельными источниками и “стоками”.

Настоящая картина температурного поля, расположенного в грунте, при этом не искажается, если отрицательный источник размещен симметрично и окружен точно таким же массивом. Следовательно, температурное поле в грунте становится определенным, если известны температура на поверхности земли и расход тепла цилиндром. Данный расход также может быть рассчитан, если известна температура поверхности массива и еще одна, любая температура в грунте.

Термические сопротивления грунта и тепловые потери при подземной прокладке теплопроводов

Когда в массиве грунта проложены два теплопровода, то соответственно им появляются два стока. Таким образом, температурное поле в грунте получится как результат наложения четырех температурных полей.[5]

В итоге результирующая формула Форхгеймера представлена в виде:

$$R_{zp} = \frac{1}{2\pi\lambda_{zp}} \cdot \left[\frac{2h_{эк}}{d_n} + \sqrt{\left(\frac{2h_{эк}}{d_n} \right)^2 - 1} \right]$$

где $R_{гр}$ — термическое сопротивление грунта, включая внешнее термическое сопротивление от грунта к воздуху, °C/(Вт/м), $\lambda_{гр}$ — теплопроводность грунта, Вт/(м°C); d_n — наружный диаметр теплоизоляционной конструкции, м.[4]

Эквивалентная глубина заложения $h_{эк}$ рассчитывается следующим образом:

$$h_{эк} = h + \frac{\lambda_{zp}}{\alpha}$$

где h — глубина заложения теплопровода от поверхности земли до его оси, м; α — коэффициент теплоотдачи от поверхности земли к воздуху, Вт/(м°C); $\frac{\lambda_{zp}}{\alpha}$ — эквивалентная толщина слоя грунта, заменяющего внешнее термическое сопротивление массива, м.[4]

Когда глубина заложения теплопровода значительная, формулу для ее расчета можно упростить:

$$R_{ep} = \frac{1}{2\pi\lambda_{ep}} \cdot \ln \frac{4h_{эк}}{d_n}$$

Теплопотери теплоизолированным трубопроводом при бесканальной прокладке в грунте, отнесенные к 1 м длины трубопровода, Вт/м, рассчитываются как теплопередача через многослойную цилиндрическую стенку:

$$Q = \frac{\tau_в - \tau_n}{\Sigma \frac{1}{2\pi\lambda_i} \cdot \ln \frac{4d_{in}}{d_{is}} + \frac{1}{2\pi\lambda_{ep}} \cdot \ln \frac{4h_{эк}}{d_n}}$$

где t_n — температура наружного воздуха, °C.

Обычно в тепловых расчетах внешнее термическое сопротивление не учитывают, тогда за расчетную температуру берут температуру грунта на глубине заложения трубопровода.

При прокладке от двух и более параллельных трубопроводов тепловых сетей бесканально тепловые потоки отдельных трубопроводов взаимодействуют, а температурные поля складываются. Когда один из трубопроводов имеет более высокую температуру, чем другой, теплопотери второго трубопровода станут меньше, а при большой разнице температур у второго трубопровода может не быть тепловых потерь.

При расчете тепловых потерь для трубопроводов, проложенных бесканально в грунте вводят условное дополнительное термическое сопротивление R_o , чтобы учесть взаимное влияние параллельно расположенных теплопроводов.

Для двухтрубных трубопроводов, проложенных бесканально, данное сопротивление определяется по формуле:

$$R_o = \frac{1}{2\pi\lambda_{ep}} \cdot \ln \sqrt{1 + \left(\frac{2h}{b}\right)^2}$$

где b — горизонтальное расстояние между осями труб, м.

Тепловые потери двухтрубных трубопроводов при бесканальной прокладке высчитываются по следующим формулам для первого и второго теплопроводов соответственно:

$$Q_1 = \frac{(\tau_1 - t_n) \cdot R_2 - (\tau_2 - t_n) \cdot R_o}{R_1 \cdot R_2 - R_o^2}$$

$$Q_2 = \frac{(\tau_2 - t_n) \cdot R_1 - (\tau_1 - t_n) \cdot R_o}{R_1 \cdot R_2 - R_o^2}$$

где τ_1 и τ_2 — температура теплоносителя в первом и втором трубопроводах, °C;

t_n — наружная температура, принимаемая равной естественной температуре грунта на глубине оси теплопровода; R_1, R_2 — термические сопротивления первого и второго трубопроводов, включающие термическое сопротивление изоляции и грунта, т. е.

$$R_i = R_{i_{из}} + R_{i_{сп}} = \sum_i \frac{1}{2\pi\lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{in}}{d_{ie}} + \frac{1}{2\pi\lambda_{сп}} \cdot \ln \frac{4h}{d_n}$$

Суммарные тепловые потери складываются из тепловых потерь первым и вторым трубопроводами[3]:

$$Q = Q_1 + Q_2$$

На сегодняшний день в соответствии с требованиями нормативных документов для проектирования конструкций тепловой изоляции двухтрубной теплосети при подземной прокладке[7] регламентируется суммарная линейная плотность теплового потока с поверхности изоляции двух трубопроводов. Таким образом определение толщины теплоизоляционной конструкции выполняется методом последовательных приближений, при котором задается толщина теплоизоляционного слоя теплопроводов и определяется суммарная плотность теплового потока с поверхности двух трубопроводов тепловой сети. Затем данные значения сравнивают с нормативными значениями плотности теплового потока, приведенными в таблицах нормативных документов[7]. Толщину тепловой изоляции трубопроводов теплосети принимают одинаковой для подающего и обратного теплопроводов.

При канальной прокладке трубопроводов тепловых сетей для расчета тепловых потерь следует учитывать ряд термических сопротивлений: изоляция $R_{из}$, теплоотдачи от изоляции к воздуху канала, теплоотдачи от воздуха канала к его стенке $R_{в.к.}$, стенок канала и грунта. Для вычисления тепловых потерь одинарных трубопроводов в канале, надо рассчитать все термические сопротивления. Тепловые потери данного трубопровода рассчитываются по формуле:

$$Q = \frac{\tau_в - t_n}{\sum R_i} \cdot (1 + \beta)$$

При канальной прокладке нескольких трубопроводов тепловых сетей, исходя из учета их взаимного влияния друг на друга, сначала определяется температура воздуха в канале по тепловому балансу, далее — теплопотери каждым теплопроводом, проложенным в канале. В данном тепловом балансе общие теплопотери всеми теплопроводами, проложенными в канале, равны теплопотерям из канала в окружающую среду:

$$\sum_1^n \frac{\tau_i - t_k}{R_{из.i} + R_{н.i}} \cdot (1 + \beta) = \frac{t_k - t_n}{R_{в.к} + R_k + R_{сп}}$$

где t_i —температура теплоносителя в i -м трубопроводе, °C; n — число трубопроводов; t_k — температура воздуха в канале, °C. Из данного уравнения определяют t_k и далее рассчитывают теплотери.[3]

Тепловые потери при воздушной прокладке теплопроводов

При воздушной прокладке тепловые потери изолированным трубопроводом в окружающую среду находят по формуле:

$$Q = \frac{\tau_{\text{в}} - t_{\text{н}}}{\frac{1}{\alpha_{\text{в}} \pi d_{\text{в}}} + \sum \frac{1}{2\pi \lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{\text{ив}}}{d_{\text{иб}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}} \pi d_{\text{н}}}}$$

где $\tau_{\text{в}}$, $t_{\text{н}}$ — средняя температура теплоносителя и температура окружающей среды, °C; $\alpha_{\text{в}}$, $\alpha_{\text{н}}$ — коэффициенты теплоотдачи от теплоносителя к стенке трубопровода (внутренний коэффициент) и от наружной поверхности изоляции в окружающую среду (наружный коэффициент), Вт/(м²·°C); $d_{\text{в}}$, $d_{\text{н}}$ — внутренний диаметр трубопровода и наружный диаметр изоляционного покрытия, м; λ_i — теплопроводность i -го слоя изоляции, Вт/(м·°C); $d_{\text{ив}}$, $d_{\text{иб}}$ —наружный и внутренний диаметры i -го слоя изоляции, м

В данной формуле все члены знаменателя соответствует определенному термическому сопротивлению. Таким образом, первое и третье слагаемые данного знаменателя, представляют собой термические сопротивления теплоотдачи соответственно от теплоносителя к стенке трубопровода и от наружной поверхности к окружающему воздуху, они вычисляются как:

$$R_{\text{в}} = \frac{1}{\alpha_{\text{в}} \pi d_{\text{в}}}; R_{\text{н}} = \frac{1}{\alpha_{\text{н}} \pi d_{\text{н}}}$$

Термическому сопротивлению i -го слоя изоляции соответствует второе слагаемое знаменателя рассматриваемой формулы:

$$R_i = \frac{1}{2\pi \lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{\text{ив}}}{d_{\text{иб}}}$$

Термическое сопротивление теплоотдачи от теплоносителя к трубопроводу и термическое сопротивление стенки трубопровода значительно невысокие по сравнению с термическим сопротивлением изоляции, следовательно данными сопротивлениями можно пренебречь. Термическое сопротивление от наружной поверхности теплоизоляции к воздуху очень мало по сравнению с термическим сопротивлением изоляции, поэтому для его расчета применяют упрощенную зависимость:

$$\alpha_i = 11,6 + 7\sqrt{w}$$

где w скорость движения воздуха, м/с.[4]

Выбор толщины основного слоя теплоизоляционной конструкции

Толщина основного слоя теплоизоляционной конструкции выбирается на основе технико-экономического расчета либо по нормам теплотерь, если задана конечная температура теплоносителя - в соответствии с перепадом температур.

При нормируемой линейной плотности теплового потока через поверхность изоляции 1 м трубопровода тепловой сети, толщина основного слоя теплоизоляционной конструкции определяется следующим образом:

$$\delta_{из} = \frac{d_n}{2} \cdot (B - 1); \ln B = 2\pi\lambda_{из} \cdot \left[\Sigma R - \frac{1}{\alpha_n \pi \cdot (d_n + 0,1)} \right],$$

где $B = d_n/d_{из}$ – отношение наружного диаметра изоляционного слоя к наружному диаметру трубы;

R –сопротивление теплопередачи от теплоносителя в окружающую среду 1 м длины теплопровода, $(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})/\text{Вт}$, [6]

Толщина слоя тепловой изоляции, которая обеспечивает заданную температуру на поверхности изоляции, определяется по вышеуказанной формуле, причем B необходимо рассчитывать по следующей зависимости:

$$B \ln B = \frac{2\lambda_{из} \cdot (\tau_{ср} - t_n)}{\alpha_{дн} \cdot (t_n - t_o)}$$

Также толщину основного слоя теплоизоляционной конструкции допускается определять по упрощенной формуле:

$$\delta_{из} = \frac{e^{2\pi\lambda_{из}\Sigma R} - 1}{2} \cdot d_n$$

где $\lambda_{из}$ - коэффициент теплопроводности основного слоя, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; ΣR - термическое сопротивление изоляционной конструкции, $(\text{м}^\circ\text{C})/\text{Вт}$.

Термическое сопротивление изоляционной конструкции определяется также исходя из нормированной плотности теплового потока q_n , $\Sigma R = \frac{\tau_{н\delta} - t_i}{q_i}$,

где $\tau_{ср}$ – расчетная среднегодовая температура теплоносителя, $^\circ\text{C}$; t_o - расчетная температура окружающей среды, $^\circ\text{C}$; q_n – нормы потери теплоты, $\text{Вт}/\text{м}$.

Заключение

Тепловой расчет помогает определить толщину слоя тепловой изоляции, а также зависит от назначения и условий применения теплоизоляционной конструкции оборудования и трубопроводов. Подбор толщины теплоизоляционного слоя для трубопроводов водяных тепловых сетей производится по формулам стационарной и нестационарной теплопередачи через цилиндрическую стенку применительно для определенных условий. В данных

расчетах рассматриваются теплофизические свойства теплоизоляционного материала в зависимости от температуры и влажности, коэффициенты излучения материала наружной поверхности изоляции, свойства деформации и степень уплотнения материала в теплоизоляционной конструкции.

Список литературы

1. Беляйкина И.В., Витальев В.П., Громов Н.К. и др.; Под ред. Громова Н.К.; Шубина Е.П. Водяные тепловые сети: Справочное пособие по проектированию. М.: Энергоатомиздат, 1988.
2. Варфоломеев Ю.М., Кокорин О.Я. Отопление и тепловые сети: Учебник. М.:ИНФРА-М, 2006.
3. Ионин А.А., Хлыбов Б.М., Братенков В.Н., Терлецкая Е.Н.; Под ред. А. А. Ионина. Теплоснабжение: Учебник для вузов. М.: Стройиздат, 1982.
4. Козин В.Е., Левина Т.А., Марков А.П., Пронина И.Б., Слемзин В.А. Теплоснабжение: Учебное пособие для студентов вузов. М.: Высш. школа, 1980.
5. Фокин В.М., Бойков Г.П., Видин Ю.В. Основы технической теплофизики: Монография М.: Издательство Машиностроение-1, 2004.
6. Хрусталеv Б.М., Кувшинов Ю.Я., Копко В.М. Теплоснабжение и вентиляция. М.: Издательство ассоциации строительных вузов, 2008.
7. СНиП 41-03-2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Актуализированная редакция.
8. СП 61.13330.2012. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Актуализированная редакция.

Рецензенты:

Шкаровский А.Л., д.т.н., профессор, профессор кафедры Теплогазоснабжения и вентиляции, СПбГАСУ, г.Санкт-Петербург.

Ласьков Н.Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Строительные конструкции», ПГУАС, г. Пенза.