

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ТЕПЛОВОЙ СЕТИ

Шоронов Д.В.

**Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Нижний Новгород, Россия**

COMPARATIVE ANALYSIS OF MODERN THERMAL INSULATION MATERIALS OF THE HEAT NETWORK

Shoronov D.V.

**Nizhny Novgorod state University of architecture and construction,
Nizhny Novgorod, Russia**

Для уменьшения теплопотерь в отопительный период, инженерами был придуман элемент конструкции, который уменьшает процесс теплопередачи и выполняют роль термического сопротивления в тепловых системах, именуемый тепловой изоляцией. В современном строительстве наиболее часто применяется перспективный синтетический утеплитель состоящий из затвердевшей полимерной пены – Пенополиуретан изоляция и утеплитель на основе полиуретановых компонентов и минерального наполнителя – Пенополимерминеральная изоляция. Состав их компонентов по качеству превосходит большинство современных аналогов. В научной работе проводится сравнение изоляции ППУ и ППМ на примере реконструирующегося объекта на улице Коминтерна, где был вынесен существующий трубопровод и применена тепловая изоляция этих двух видов.

На рисунке 1 изображен трубопровод прошедший антикоррозийную обработку. Далее на этот участок в соответствии с техническим заданием будет установлена изоляция под названием ППУ.



Рис 1. П-образный компенсатор на участке тепловой сети. Антикоррозийная обработка.

На рисунке 2 мы видим уже установленную пенополиуретановую изоляцию и окончательное устройство трубопровода перед установкой плит перекрытия на лотковую часть и обратной засыпкой системы.

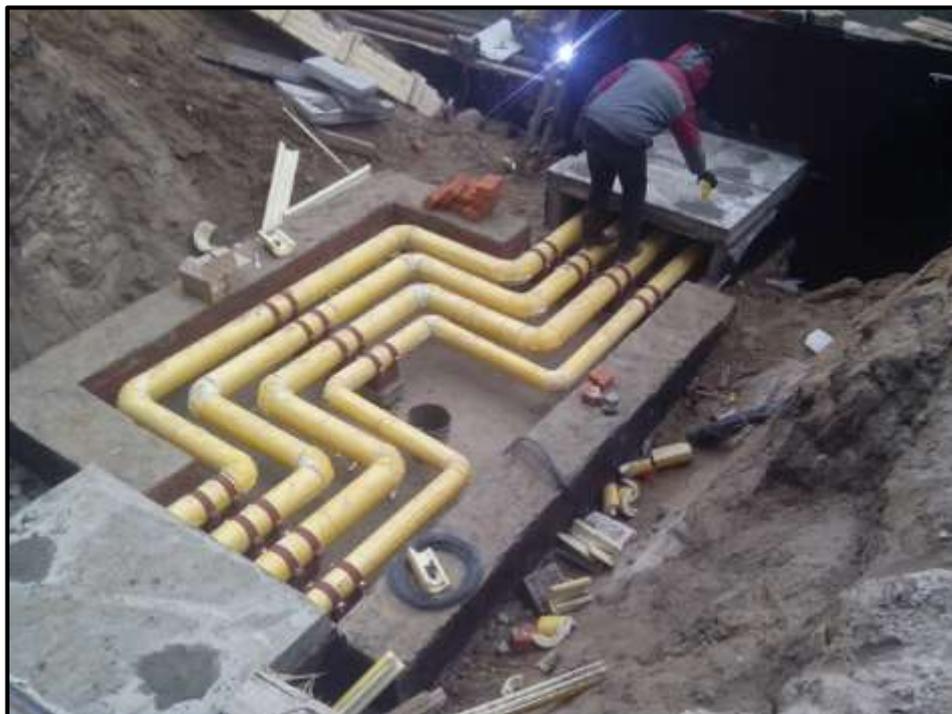


Рис 2. П-образный компенсатор на участке тепловой сети. Тепловая изоляция ППУ.

На рисунке 3 показан трубопровод в процессе установки тепловой изоляции с применением Пенополимерминеральная полуцилиндров.

ППМ цилиндры относятся к классу жестких пенополиуретанов и представляет собой массу вспененного пенополиуретана, с введенным в неё минеральным наполнителем (песок, зола и т.п.). Химической реакции между наполнителем и компонентами полимера при изготовлении ППМ изоляции не происходит, то есть композиция полимера и минерального наполнителя в ППМ изоляции представляет собой смесь. Чаще всего основу ППМ изоляции составляют пенополиуретановая система и мелкодисперсный минеральный наполнитель. Введение в состав пенополиуретанов значительного количества мелкодисперсного минерального наполнителя (более 40% по массе) в качестве структурирующей добавки имело своей целью получить материал, совмещающий в себе свойства пенополиуретанов и полимербетонов, а также существенно сократить расход компонентов и снизить стоимость этого материала.

Введение в состав пенополиуретанов минеральных наполнителей и других специальных функциональных добавок в количествах, образующих высоконаполненные системы, улучшает физико-механические, тепло-физические, антикоррозионные, технологические и другие характеристики материала. ППМ совмещает в себе свойства теплоизоляционных пенопластов и прочных гидрофобных полимербетонов. Такие материалы

могут быть созданы на различной синтетической основе, модифицированной минеральными наполнителями и специальными функциональными добавками.



Рис 3. Участок тепловой сети подготовленный для тепловой изоляции ППМ.

И на рисунке 4 изображен трубопровод изолированный ППМ, готовящийся к приемочному гидравлическому испытанию.



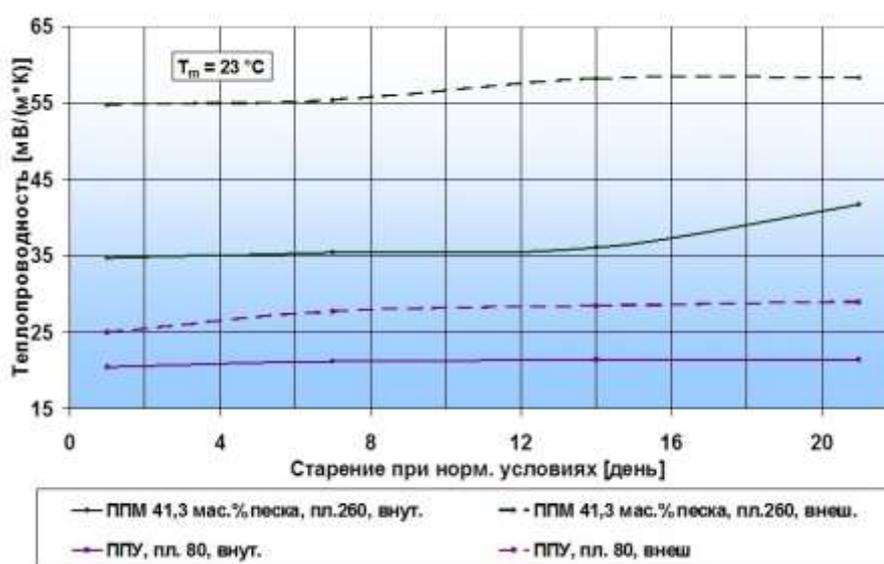
Рис 4. Участок тепловой сети смонтированный с применением ППМ.

Пенополимерминеральная и пенополиуретановая изоляция монтируется на трубопроводы с одинаковым диаметром, при одинаковой толщине стенки и будет использоваться при одинаковой тепловой нагрузке, что позволит нам провести исследование с минимальными погрешностями. Следует напомнить, что оба типа изоляции (с наружным гидроизоляционным слоем и без него) рекомендованы и не противоречат [1].

Для облегчения нашей задачи обратимся к результатам лабораторных испытаний, представленным компанией BASF на ежегодной международной конференции "Тепло России" в 2010 году в Санкт-Петербурге.

Рассмотрим график изменения теплопроводности при старении для сухого ППУ и ППМ:

Исследование проводилось при не защищенном верхнем слое, как и подразумевает проект реконструкции тепловых сетей.



Коэффициент теплопроводности ППМ возрастает на 20% через 20 дней после использования при нормальном уровне влажности не более 75%, в то время как у ППУ он вырос лишь на 4%.

Вывод: Преимущество на стороне ППУ.

График водопоглощения ППУ и ППМ:

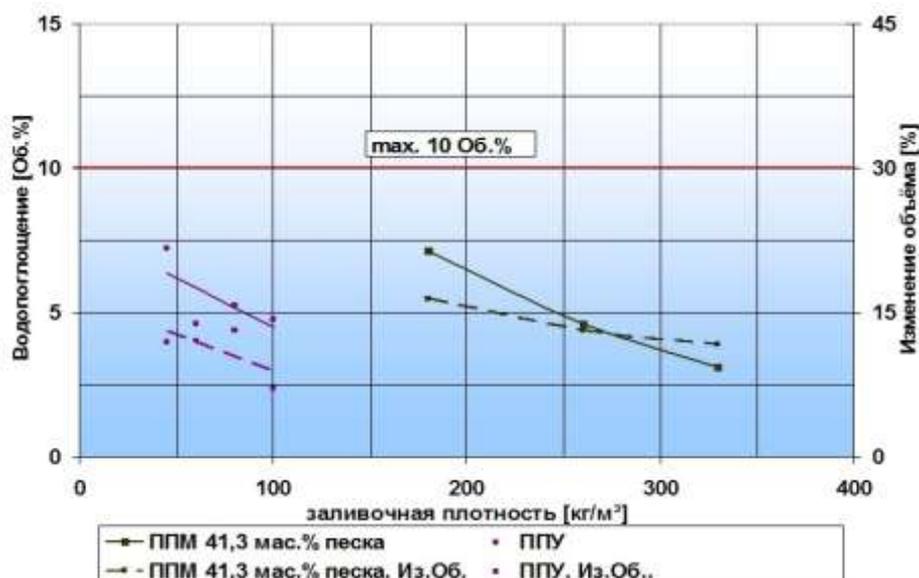


График показывает что при равных условиях ППМ впитывает влагу сильнее чем ППУ и получается что трубопровод будет сильнее разрушаться в такой изоляции под воздействием коррозии. Вывод: Преимущество на стороне ППУ.

Теперь необходимо выяснить сколько же придется потратить на покупку того или другого материала для этого нужно выполнить расчет толщины тепловой изоляции трубопроводов. Для этого производится теплотехнический расчет рассматриваемых материалов, при глубине заложения 0,7 метров. Термическое сопротивление взаимного влияния теплопроводов при двухтрубной (четырёхтрубной) прокладке тепловых сетей определяется следующим образом:

Термическое сопротивление теплоизоляции:

$$R_{из} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{гр}} \cdot \ln \frac{d_{из}}{d_n}, \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C/Вт} \quad [1]$$

где, $\lambda_{гр}$ – теплопроводность грунта Вт/ м $^\circ\text{C}$

$d_{из}$ – наружный диаметр теплоизоляционной конструкции, м;

d_n – наружный диаметр трубопровода, м;

Термическое сопротивление грунта $R_{гр}$ определяется по формуле Форхгеймера.

При малом заложении трубопроводов тепловых сетей при $h/d < 2$

Где, h – глубина заложения труб, м;

d – диаметр изолированного трубопровода, м;

$$R_{гр} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{гр}} \cdot \ln \left[\frac{2 \cdot h_{пр}}{d_{из}} + \sqrt{\left(\frac{4 \cdot h_{пр}^2}{h_{из}^2} - 1 \right)} \right], \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C/Вт} \quad [2]$$

где, приведенная глубина заложения равна:

$$h_{пр} = h_d + h_{ф}, \text{ м} \quad [3]$$

где h_d – действительная глубина заложения трубопровода, м;

$h_{ф}$ – толщина фиктивного слоя, м;

Толщина фиктивного слоя:

$$h_{ф} = \frac{\lambda_{гр}}{a_{гр}}, \text{ м} \quad [4]$$

где $\lambda_{гр}$ – теплопроводность грунта Вт/ м $^\circ\text{C}$

$a_{гр}$ – коэффициент теплоотдачи грунта Вт/ м² $^\circ\text{C}$

При большом заложении $h/d \geq 2$ сопротивление грунта определяется:

$$R_{гр} = \frac{\ln\left(\frac{4h}{d}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{гр}}, \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C/Вт} \quad [5]$$

где, h – глубина заложения, м;

$\lambda_{гр}$ – теплопроводность грунта Вт/ м $^\circ\text{C}$

d – диаметр изолированного трубопровода, м;

Общее сопротивление грунта и изоляции:

$$R_{\text{сиг}} = R_{\text{гр}} + R_{\text{из}}, \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт} \quad [6]$$

Термическое сопротивление взаимного влияния теплопроводов при двухтрубной (четырёхтрубной) прокладки определяем по формуле Шубина Е.П.:

$$R_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{\text{гр}}} \cdot \ln \sqrt{1 + \left(\frac{2h}{b}\right)^2}, \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт} \quad [7]$$

где, h – глубина заложения трубопровода, м

b – расстояние между осями соседних трубопроводов, м

Таблица 1. Характеристика материалов

Изоляционный материал	Условный проход трубопровода, мм	Средняя плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/м °С*	Макс. температура применения, °С	Предел прочности при сжатии, МПа
ППМ	89–159	60–95	0,04	150	1,2
ППУ	89–159	80	0,042	300	0,3
Пенополистирол	89–159	10-40	0,052	150	1,0

*в зависимости от условий эксплуатации

Результаты расчета сведены в таблицу 2;

Таблица 2. Термические сопротивления

Обозначение	Значения			
	ППМ			
d_n , мм	89	108	133	159
d_n / d_o , мм	189/189	208/208	233/233	259/259
$R_{\text{из}}, \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	6,2	5,7	5,6	5,07
h / d , м	2,95	2,65	2,34	2,0
$h_{\text{ф}}$, м	0,12	0,12	0,12	0,12
$h_{\text{пр}}$, м	0,82	0,82	0,82	0,82
$R_{\text{гр}}, \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	0,38	0,36	0,34	0,33
$R_{\text{сиг}}, \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	6,58	6,1	5,94	5,4
$R_0, \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	0,2	0,18	0,17	0,16
	ППУ			
d_n , мм	89	108	133	159
d_n / d_o , мм	169/169	188/188	213/213	249/249
$R_{\text{из}}, \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	6,43	5,92	5,78	5,49
h / d , м	2,95	2,65	2,34	2,0
$h_{\text{ф}}$, м	0,12	0,12	0,12	0,12
$h_{\text{пр}}$, м	0,82	0,82	0,82	0,82
$R_{\text{гр}}, \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	0,44	0,42	0,4	0,38
$R_{\text{сиг}}, \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	6,87	6,34	6,18	5,87
$R_0, \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	0,2	0,18	0,17	0,16

Обозначение	Значения			
	Пенополистирол			
d_n , мм	89	108	133	159
d_n / d_o , мм	189/189	208/208	233/233	259/259
$R_{из}$, м ² °С/Вт	5,9	5,4	5,1	4,9
h / d , м	2,95	2,65	2,34	2,0
$h_{ф}$, м	0,12	0,12	0,12	0,12
$h_{пр}$, м	0,82	0,82	0,82	0,82
$R_{гр}$, м ² °С/Вт	0,36	0,34	0,32	0,3
$R_{сиг}$, м ² °С/Вт	6,26	5,74	5,42	5,2
R_0 , м ² °С/Вт	0,2	0,18	0,17	0,16

Следующим этапом определяются удельные тепловые потоки для двухтрубной (четырёхтрубной канальной прокладки по формулам:

Удельные потери тепла через изоляционную конструкцию тепловых сетей для подающего и обратного трубопровода:

$$q_1 = \frac{(\tau_{1ср} - \tau_0) \cdot R_{сиг2} - (\tau_{2ср} - \tau_0) \cdot R_0}{R_{сиг1} \cdot R_{сиг2} - R_0^2}, \text{ Вт} \quad [8]$$

$$q_2 = \frac{(\tau_{2ср} - \tau_0) \cdot R_{сиг1} - (\tau_{1ср} - \tau_0) \cdot R_0}{R_{сиг1} \cdot R_{сиг2} - R_0^2}, \text{ Вт} \quad [9]$$

где, $\tau_{1ср}$ – среднегодовая температура теплоносителя подающего трубопровода °С;

где, $\tau_{2ср}$ – среднегодовая температура теплоносителя обратного трубопровода °С;

τ_0 – температура окружающего воздуха, °С; (принимается за температуру наиболее холодной пятидневки)

$R_{сиг1}$ – термическое сопротивление трубопровода, м² °С/Вт;

$R_{сиг2}$ – термическое сопротивление трубопровода, м² °С/Вт;

Среднегодовая температура теплоносителя $\tau_{1ср}$, $\tau_{2ср}$ определяется следующим образом:

$$\tau_{1ср} = \frac{123,1 \cdot n_1 + \tau_{12} \cdot n_2 + \tau_{1n} \cdot n_n}{m}, \text{ °С} \quad [10]$$

$$\tau_{2ср} = \frac{\tau_{21} \cdot n_1 + \tau_{22} \cdot n_2 + \tau_{2n} \cdot n_n}{m}, \text{ °С} \quad [11]$$

где, τ_{11} , τ_{12} , τ_{1n} , - температура теплоносителя в подающем трубопроводе с интервалом температуры наружного воздуха в 5 °С, °С

где, τ_{21} , τ_{22} , τ_{2n} , - температура теплоносителя в подающем трубопроводе с интервалом температуры наружного воздуха в 5 °С, °С

n_1 , n_2 , n_n – продолжительность стояния температуры наружного воздуха с интервалом в 5 гр.;

m – длительность работы теплопровода 8400 ч/год;

Определим суммарный удельный тепловой поток для каждого диаметра:

$$q_{\text{общ}} = q_1 + q_2, \text{ Вт}; \quad [12]$$

где q_1 – тепловые потери на подающем трубопроводе, Вт;

q_2 – тепловые потери на обратном трубопроводе, Вт;

Общий тепловой поток по длине трубопровода конкретного диаметра определяется:

$$q_1 = q_{\text{общ}} \cdot l, \text{ Вт} \quad [13]$$

где, $q_{\text{общ}}$ – суммарный удельный тепловой поток, Вт;

l – длина участка, м

Результаты расчета сведены в таблицу 3.

Таблица 3. Тепловые потери трубопроводов

Обозначение	Значения			
	ППМ			
d_n , мм	89	108	133	159
q_1 , Вт	22,15	22,18	23,25	22,68
q_2 , Вт	15,79	15,82	16,56	16,16
$q_{\text{общ}}$, Вт	37,94	38,0	39,9	38,84
q_l , Вт	2655,8	11020	4907,7	12556
	ППУ			
d_n , мм	89	108	133	159
q_1 , Вт	21,32	20,48	21,95	21,38
q_2 , Вт	14,49	14,52	15,26	14,86
$q_{\text{общ}}$, Вт	35,81	35,0	37,21	36,24
q_l , Вт	1933	9100	4167	11016
	ПЕНОПОЛИСТИРОЛ			
d_n , мм	89	108	133	159
q_1 , Вт	23,1	24,4	25,74	26,1
q_2 , Вт	15,79	15,82	16,56	16,7
$q_{\text{общ}}$, Вт	38,89	40,22	42,3	42,8
q_l , Вт	2722	11663	5202	13995

По данным таблицы очевидно, что наименьшие теплотери соответственно у пенополиуретана.

Для определения стоимости тепловой изоляции был выполнен технико-экономический расчет

Объем изоляционного материала:

$$V_{и} = \pi \cdot (d_{из} + 2 \cdot \delta_{из}) \cdot \delta_{из}, \text{ м}^3/\text{м}; \quad [14]$$

где, $d_{из}$ – наружный диаметр теплоизоляционной конструкции, мм;

$\delta_{из}$ – толщина изоляции, мм;

Капитальные вложения в тепловую изоляцию считаем без учета покровного слоя, поскольку для всех видов изоляции он будет одинаков:

$$K_{и} = V_{и} \cdot C_{и}, \text{ 1/год}; \quad [15]$$

где, $V_{и}$ – объем тепловой изоляции, м^3

$C_{и}$ – стоимость изоляции, руб/ м^3

Капитальные вложения в тепловую изоляцию общая

$$K_{и}^* = K_{под} + K_{обр}, \text{ 1/год}; \quad [16]$$

где, $K_{под}$ – капитальные вложения в подающий трубопровод, 1/год;

$K_{обр}$ – капитальные вложения в обратный трубопровод, 1/год;

Приведенные затраты на потери тепла:

$$S_{пт} = z_{т} \cdot q_{общ} \cdot m \cdot 3,6 \cdot 10^{-6}, \text{ руб/год}; \quad [17]$$

где, $z_{т}$ – затраты на тепловую энергию, руб/ГДж;

$q_{общ}$ – суммарный тепловой поток;

m - длительность работы теплопровода 8400 ч/год;

$$Z_{пр} = S_{пт} + (f_{и} + E_{и}) \cdot K_{и}^*, \text{ руб/год}; \quad [18]$$

где, $E_{и}$ – коэффициент эффективности капитальных вложений 1/год;

$f_{и}$ – доля годовых отчислений на эксплуатацию тепловой изоляции 1/год (0,093);

Общие затраты на изоляцию определим по формуле:

$$Z_{общ} = \sum_i^n \cdot Z_i \cdot l_i, \text{ руб./год}; \quad [19]$$

где, Z_i – затраты на 1 метр изоляции, руб;

l_i – длина трубопровода, м;

Результаты расчета приведены в таблице 4;

Таблица 4. Технико-экономический расчет

Обозначение	Значения			
	ППМ			
d_n , мм	89	108	133	159
$V_{и}$, м ³ /м	0,23	0,27	0,33	0,54
$K_{и}$, руб/год	13,6	14,2	17,8	31,8
$K_{и}^*$, руб/год	27,2	28,4	35,6	63,6
$S_{пт}$, руб/год	1,53	1,61	1,67	1,84
$(f_{и} + E_{и}) \cdot K_{и}^*$, 1/год	10,6	11,1	14,0	25,0
$Z_{пр}$, руб/год	12,13	12,71	15,67	26,84
$Z_{общ}$, руб/год	849	3685	1927	8776
$\sum Z_{общ}$, руб/год	15237			
	ППУ			
d_n , мм	89	108	133	159
$V_{и}$, м ³ /м	0,23	0,27	0,33	0,54
$K_{и}$, руб/год	11,3	13,3	16,1	28,3
$K_{и}^*$, руб/год	22,6	26,6	32,2	56,6
$S_{пт}$, руб/год	1,41	1,43	1,45	1,46
$(f_{и} + E_{и}) \cdot K_{и}^*$, 1/год	8,8	10,4	12,6	22,2
$Z_{пр}$, руб/год	10,2	11,83	14,0	23,6
$Z_{общ}$, руб/год	550,8	3075,8	1568	7174
$\sum Z_{общ}$, руб/год	12368			
	Пенополистирол			
d_n , мм	89	108	133	159
$V_{и}$, м ³ /м	0,23	0,27	0,33	0,54
$K_{и}$, руб/год	14,1	14,5	18,1	21,4
$K_{и}^*$, руб/год	27,2	28,4	35,6	63,6
$S_{пт}$, руб/год	1,57	1,71	1,73	1,81
$(f_{и} + E_{и}) \cdot K_{и}^*$, 1/год	10,6	11,1	14,0	25,0
$Z_{пр}$, руб/год	12,17	12,81	15,73	26,8
$Z_{общ}$, руб/год	852	3715	1934	8763
$\sum Z_{общ}$, руб/год	15264			

Вывод:

Анализ свойств теплоизоляционных материалов показал, что самым эффективным и не дорогим является пенополиуретан. Основу как ППУ изоляции, так и ППМ изоляции составляет пенополиуретан. При выборе того или иного типа изоляции, исходя из целей обеспечения надежности и экономичности теплоснабжения, мы должны ориентироваться на такие критерии, как теплоизоляционные показатели и их изменение в процессе эксплуатации, появление повреждений трубопровода и изоляции и их своевременное обнаружение и устранение. Подводя итог, можно сделать вывод, что трубы в ППМ изоляции трудно рассматривать как эффективную и перспективную технологию, которая может обеспечить реальное энергосбережение и надежность эксплуатации тепловых сетей, особенно в случае бесканальной прокладки. Трубы в ППУ изоляции- оптимальное соотношение “цена качество”.

Литература:

- [1]. СП 124.13330.2012 Тепловые сети. Актуализированная редакция СНиП 41-02-2003.
- [2]. Международный научный журнал. Молодой учёный. ISSN 2072-0297