

АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ С СОВРЕМЕННЫМИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ ДЛЯ ПОДЗЕМНОГО БЕСКАНАЛЬНОГО СПОСОБА ПРОКЛАДКИ ТЕПЛОТРАССЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

И.В. ЮДАЕВ¹, д.т.н., профессор

А.А. СЕРЕГИН², д.т.н., профессор

А.Н. ТОКАРЕВА², к.т.н., доцент

Н.Н. ГРАЧЕВА², к.т.н., доцент

А.Н. ПОСТОВАЛОВ², магистрант

¹ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский ГАУ", 196601, г. Санкт-Петербург, г. Пушкин, Петербургское шоссе, 2

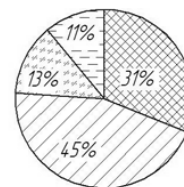
²Азово-Черноморский инженерный институт – филиал ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 347740, г. Зерноград, ул. Ленина, 21

Аннотация. Рассмотрены вопросы использования в системе теплоснабжения трубопроводов с такими современными теплоизоляционными материалами как пенополиуретан, армопенобетон, пенополиминерал, пеностекло и базальтовая вата. Для всех видов покрытий установлены зависимости изменения минимальной толщины изоляционного слоя от диаметра трубопровода. По результатам реализации трехфакторного машинного эксперимента определены функции изменения тепловых потерь от диаметра и глубины закладки трубопровода. Теплофизические характеристики изоляционных материалов при подземном способе прокладки не оказывают влияния на величину тепловых потерь.

Ключевые слова: трубопровод, тепловые потери, диаметр, глубина, изоляция.

На долю тепловой энергии приходится 30% всего конечного потребления энергии [1]. При этом в структуре потребления энергоносителей в промышленности тепловая энергия занимает 31%, в жилищно-коммунальном секторе 50%. В системе энергообеспечения административных и общественных зданий эта цифра достигает 63%.

Теплоснабжение любого объекта представляет собой традиционную систему производства и распределения энергоносителей, в состав которой входят: источник (котельная установка), коммуникации (теплопроводы) и потребитель. В каждом из этих трех элементов происходят потери вырабатываемой энергии, в данном случае тепловой. Наибольшие потери теплоты происходят в теплопроводах. Их величина достигает 54% от общих потерь тепловой энергии в системе теплоснабжения. Потери теплоты при транспортировании энергоносителя от источника теплоснабжения к потребителю происходят по различным причинам. Структура причин потерь тепловой энергии в трубопроводах [2] приведена на рисунке 1.







-  Низкое качество тепловой изоляции теплопроводов
-  Использование старых сетевых насосов с низким КПД
-  Неправильное шайбирование подключенных к теплотрассе объектов
-  Нерационально составленная схема ГВС

Рис.1. Структура причин потерь тепловой энергии в теплопроводах

Таким образом, 45% потерь тепловой энергии в теплопроводах происходит из-за использования низкокачественной изоляции. Следовательно, энергоэффективным мероприятием в системе теплоснабжения является применение трубопроводов с изоляционными материалами, обладающими наиболее совершенными теплофизическими характеристиками [3].

В настоящее время наиболее распространенными материалами, используемыми в качестве изолятора для теплопроводов, являются пенополиуретан, армопенобетон (АПБ) и пенополиминерал (ППМ) [4]. В последнее время разработаны новые

теплоизоляционные материалы [5,6]: пенокварц, базальтовая вата, пенополистирол, жидкокристаллическая теплоизоляция.

Однако максимальная температура применения пенополистирола не превышает 75°C, что ограничивает использование данного материала для изоляции отопительных теплопроводов и паропроводов.

Проведенные исследования теплопроводов с жидкокристаллической изоляцией показали [6], что теплофизические характеристики рассматриваемого изоляционного материала не соответствуют показателям, заявленным производителями. Фактические потери теплоты в теплопроводах с предлагаемым покрытием превышают потери при использовании традиционной теплоизоляции из минеральной ваты.

Поэтому рассмотрим использование в качестве изолятора теплопроводов тепловых сетей таких материалов, как пенополиуретан, армопенобетон, пенополиминерал, пенокварц и базальтовая вата применительно к условиям Ростовской области для подземного бесканального способа прокладки.

Удельные потери теплоты определяются следующим образом:

$$q = \frac{t_1 - t_0}{\frac{1}{2\pi\lambda_{из}} \ln \frac{d_{н.и.}}{d_{в.и.}} + \frac{1}{2\pi\lambda_{гр}} \cdot \ln \frac{4h}{d_{н.и.}}} \leq q_{доп}, \quad (1)$$

где $d_{в.и.}$ – внутренний диаметр изоляции, принимается равным наружному диаметру теплопровода, m ; $d_{н.и.}$ – диаметр наружной изоляции, m .

Диаметр наружной изоляции равен

$$d_{н.и.} = d_{в.и.} + 2\delta, \quad (2)$$

где δ – толщина изоляции, m ; $t_{н.и.}$ – температура наружной поверхности изоляции, принимается в соответствии с данными СП 61.13330.2012 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов» равной $t_{н.и.} = 60^\circ\text{C}$; $\lambda_{гр}$ – теплопроводность грунта, для черноземов $\lambda_{гр} = 1,75 \frac{Вт}{м \cdot ^\circ\text{C}}$; h – глубина закладки теплопроводов, m ; $\lambda_{и}$ – коэффициент теплопроводности изоляционного материала, $\frac{Вт}{м \cdot ^\circ\text{C}}$; t_1 – расчетная температура теплоносителя, в соответствии с требованиями СП 61.13330.2012 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов» для отопительных теплопроводов, работающих в режиме 95/70°C и для теплопроводов сети горячего водоснабжения принимается равной $t_1 = 65^\circ\text{C}$; t_0 – температура окружающей среды, зависит от режима работы тепловых сетей.

При подземном способе прокладки температура окружающей среды принимается равной средней температуре грунта за год при круглогодичной работе теплопроводов и средней температуре грунта за отопительный период при работе теплопроводов только в данный временной интервал. Значения температуры грунта в зависимости от глубины залегания теплопровода и режима работы сетей были определены из графических зависимостей, построенных по данным [7].

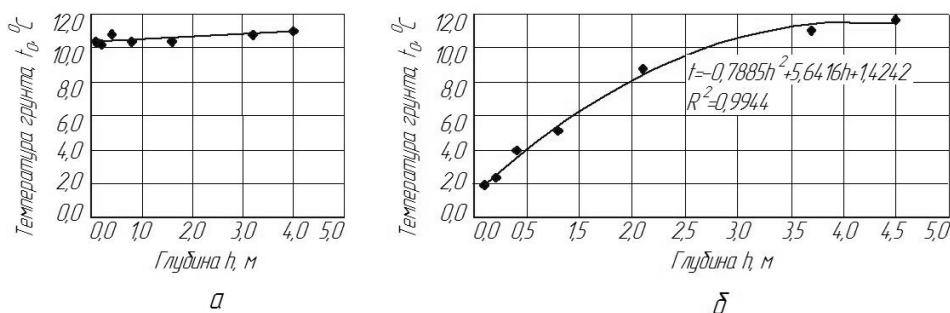


Рис.2. Изменение температуры грунта по глубине: а) при круглогодичной работе тепловых сетей; б) при работе сетей в отопительный период

Как видно из представленных графиков, средняя температура грунта за год

практически не изменяется по всей возможной глубине закладки теплопроводов.

Средняя температура грунта за отопительный период зависит от глубины h , и эта зависимость выражается полиномом второго порядка с коэффициентом аппроксимации $R^2 = 0,9944$.

$$t_0 = -0,7855h + 5,6414h + 1,4242 \quad (3)$$

Подставляя уравнения (2, 3) в выражение (1) и используя графический метод [8], была определена наименьшая толщина изоляции,

при которой потери теплоты не превышают предельно допустимые значения для всех рассматриваемых теплоизоляционных материалов. Изменение минимальной допустимой толщины изоляции в зависимости от диаметра трубопроводов и используемого изоляционного материала представлены в виде гистограмм на рисунке 3.

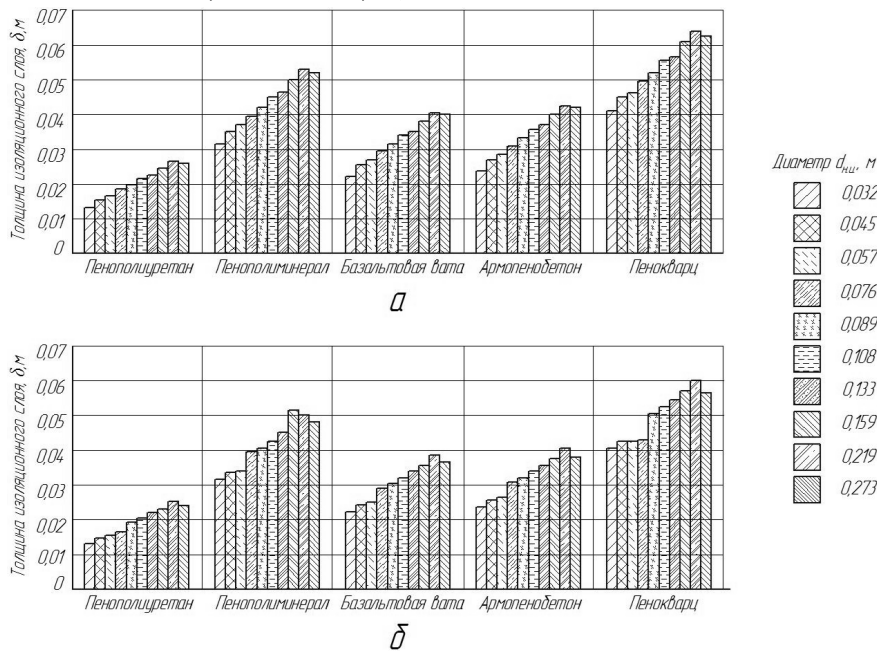


Рис.3. Изменение минимальной толщины изоляции в зависимости от диаметра трубопровода и вида изоляционного материала: а) при круглогодичной работе тепловых сетей; б) при работе сетей в отопительный период

Полученные результаты были обработаны с помощью среды Microsoft Excel. Уравнения функций минимальной толщины

изоляционного слоя для различных материалов, способов прокладки и режимов работы тепловых сетей приведены в таблице 1.

Таблица 1

Уравнения функций минимальной толщины изоляционного слоя от диаметров трубопроводов

Материал изоляционного слоя и коэффициент его теплопроводности	Режим работы сетей			
	Круглогодичный		Отопительный период	
Пенополиуретан $\lambda = 0,033 \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$	$d_{н.и.} = 1,1084d_{в.и.} + 0,028$ $R^2 = 0,9985$	(4)	$d_{н.и.} = 10986d_{в.и.} + 0,027$ $R^2 = 0,9984$	(9)
Пенополиминерал $\lambda = 0,06 \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$	$d_{н.и.} = 1,1751d_{в.и.} + 0,0655$ $R^2 = 0,9964$	(5)	$d_{н.и.} = 1,1566d_{в.и.} + 0,0646$ $R^2 = 0,9939$	(10)
Базальтовая вата $\lambda = 0,048 \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$	$d_{н.и.} = 1,1485d_{в.и.} + 0,047$ $R^2 = 0,9974$	(6)	$d_{н.и.} = 1,1286d_{в.и.} + 0,0461$ $R^2 = 0,9971$	(11)
Армопенобетон $\lambda = 0,05 \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$	$d_{н.и.} = 1,1538d_{в.и.} + 0,0498$ $R^2 = 0,9972$	(7)	$d_{н.и.} = 1,131d_{в.и.} + 0,0492$ $R^2 = 0,9966$	(12)
Пенокварц $\lambda = 0,07 \frac{Вт}{м \cdot ^\circ C}$	$d_{н.и.} = 1,186d_{в.и.} + 0,0845$ $R^2 = 0,9958$	(8)	$d_{н.и.} = 1,161d_{в.и.} + 0,0807$ $R^2 = 0,994$	(13)

Выбирая соответствующие выражение из ряда (4–13) и подставляя его в уравнение (1), можно рассчитать удельные потери теплоты для каждого вида теплоизоляционного материала, диаметра трубопровода и глубины его закладки. С учетом этих трех факторов был проведен машинный эксперимент по определению рационального сочетания параметров теплотрассы, при которых обеспечиваются минимальные потери тепловой энергии.

Интервалы варьирования для реализации трехфакторного эксперимента на двух уровнях были приняты из следующих соображений. Первый фактор – это коэффициент теплопроводности изоляционного материала. Данная величина для рассматриваемых изоляционных материалов колеблется в пределах от $0,033 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}$ до $0,07 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}$. Следовательно, низший уровень варьирования первого фактора составляет $\lambda = 0,033 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}$, что соответствует использованию трубопроводов в пенополиуретановой изоляции. Верхний уровень первого фактора отражает применение труб с тепловой изоляцией из пенокварца и равняется $\lambda = 0,07 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}$.

Второй фактор соответствует диаметру трубопровода. За низший уровень принят минимально существующий диаметр тепловых сетей, равный $d_{\text{в.и.}}=0,032\text{м}$ в соответствии с ГОСТ 30732-2006 «Трубы и фасонные изделия стальные с тепловой изоляцией из пенополиуретана с защитной оболочкой.

Технические условия». Гидравлические расчеты для различных объектов ЖКХ, административных и общественных зданий показывают, что диаметр трубопроводов не превышает 0,5м. Поэтому верхний уровень варьирования второго фактора принят равным $d_{\text{в.и.}}=0,5\text{м}$. При определении зависимостей изменения диаметра наружной изоляции (4–13) максимальный диаметр трубопровода принимался равным $d_{\text{в.и.}}=0,273\text{м}$. Полученные коэффициенты аппроксимации, практически равные единице (таблица 1), позволяют использовать расчеты потерь теплоты по полученным уравнениям и для других размеров трубопроводов.

Уровень варьирования третьего фактора – глубины закладки трубопровода – изменяется в пределах 0,8–4м. Данные величины приняты в соответствии с требованиями СП 315.1325800.2017 «Тепловые сети бесканальной прокладки. Правила проектирования» к минимальной и максимальной глубине залегания теплопроводов. Таким образом, минимальная глубина закладки составляет $h=0,8\text{м}$, максимальная $h=4\text{м}$.

Трехфакторный машинный эксперимент по определению удельных потерь теплоты был выполнен по типовой матрице планирования [9]. Результаты реализации многофакторного эксперимента представлены в таблице 2. В скобках указаны уровни варьирования. Нижний уровень указывается со знаком (-), верхний – со знаком (+).

Таблица 2

Результаты реализации трехфакторного эксперимента

№ строки матрицы	Коэффициент теплопроводности $\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°C}}$	Диаметр трубопроводов $d_{\text{в.и.}}, \text{м}$	Глубина закладки $h, \text{м}$	Удельные потери теплоты $q, \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$ для режима работы	
				Круглый год	Отопительный период
1	0,033(-)	0,032(-)	0,8(-)	14,859	16,722
2	0,07(+)	0,032(-)	0,8(-)	16,240	18,238
3	0,033(-)	0,53(+)	0,8(-)	62,436	72,342
4	0,07(+)	0,53(+)	0,8(-)	67,030	78,509
5	0,033(-)	0,032(-)	4(+)	14,287	14,460
6	0,07(+)	0,032(-)	4(+)	15,560	15,714
7	0,033(-)	0,53(+)	4(+)	53,452	55,292
8	0,07(+)	0,53(+)	4(+)	56,784	59,243

Полученные числовые массивы были обработаны с помощью программы «Statistica». В результате обработки получили зависимости, графическая интерпретация которых представлена на рисунках 4 и 5.

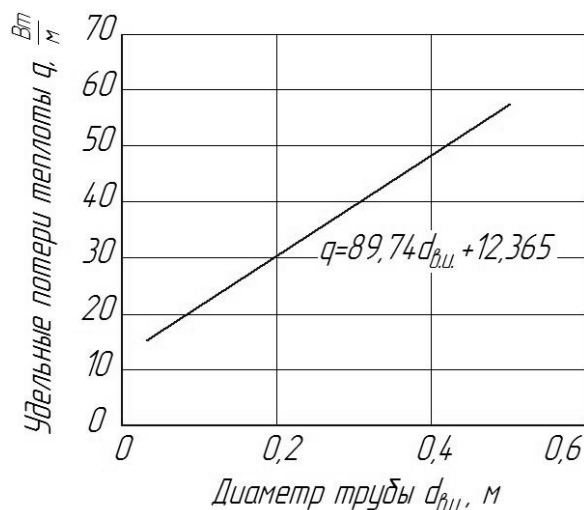


Рис.4. Изменение тепловых потерь при круглогодичном режиме работы тепловых сетей

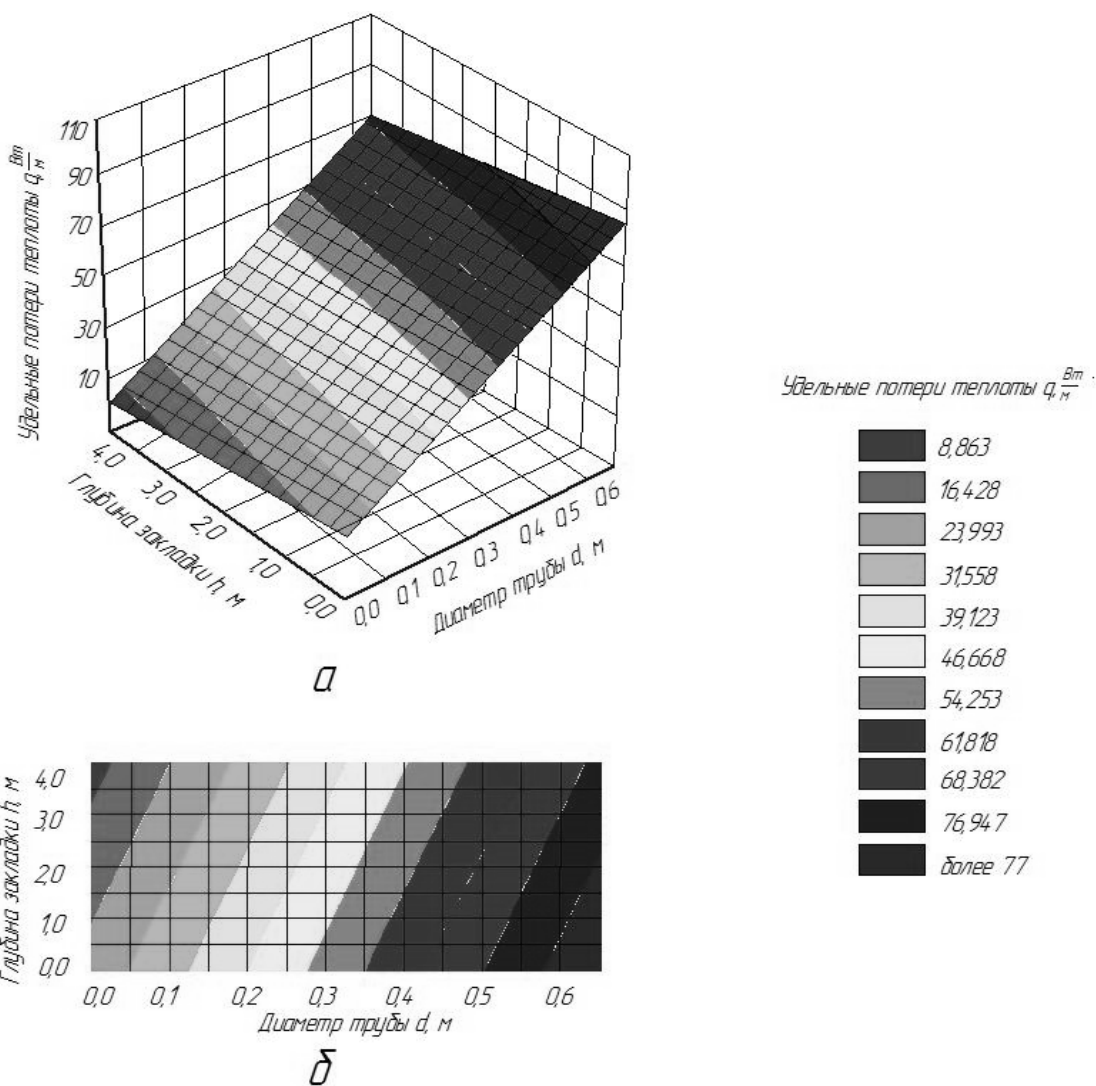


Рис.5. Поверхность отклика (а) и контурный график (б) целевой функции зависимости изменения тепловых потерь от глубины закладки (h) и диаметра трубопровода ($d_{в.и.}$) при работе тепловых сетей в отопительный период

Функция изменение тепловых потерь при круглогодичном режиме работы тепловых сетей носит линейный характер и выражается уравнением

$$q = 12,365 + 89,74d_{в.и.}, \quad (14)$$

с коэффициентом аппроксимации $R^2=0,968$. Таким образом, при круглогодичном использовании сетей на тепловые потери оказывает влияние только диаметр трубопровода. Глубина закладки и теплофизические характеристики теплоизоляционного материала на величину тепловых потерь не влияют. Отсутствие значимости глубины закладки можно объяснить тем, что среднегодовая температура грунта при различной глубине практически не меняется (рисунок 2а).

Поверхность отклика потерь теплоты при работе сетей только в отопительный период представляет собой «возвышающийся гребень» [8] и описывается следующей целевой функцией

$$q = 20,774 + 100,529d_{в.и} - 3,211h, \quad (15)$$

с коэффициентом аппроксимации $R^2=0,96$. В этом случае потери зависят не только от диаметра, но и от глубины закладки трубопровода, так как средняя температура грунта за отопительный период зависит от расположения трубы в грунте в соответствии с выражением (2).

Полученная целевая функция (14) не имеет экстремума. Потери теплоты возрастают с увеличением диаметра трубопровода и снижаются с увеличением глубины закладки. Коэффициент теплопроводности изоляционного материала в данном случае влияния на потери теплоты также не оказывает. Это можно объяснить тем, что данная теплофизическая величина современных теплоизоляционных материалов изменяется в незначительных пределах (таблица 1).

Таким образом, при эксплуатации тепловых сетей с подземной бесканальной прокладкой в условиях Ростовской области тепловые потери не зависят от теплофизических характеристик современных изоляционных материалов. При выборе изоляции теплопроводов необходимо

руководствоваться только сметной стоимостью выполнения работ и технико-экономическими показателями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Башмаков, И.А. Повышение энергоэффективности в системах теплоснабжения. Часть 1. Проблемы российских систем теплоснабжения /И.А. Башмаков// Энергосбережение. – 2010 – №2.–С.46-54.
2. Бакай, С. М. Инновационные резервы снижения потерь в тепловых сетях предприятий /С.М.Бакай, С.О.Казакова//Управление экономикой: методы, модели, технологии //Материалы 18 Международной научной конференции.– УФА, 2018.– С.158-161.
3. Смородова, О.В. Моделирование оптимизации тепловых потерь при распределении энергоносителей/О.В. Смородова и [др] // Энергосбережение и водоподготовка. – 2019 – №1(117). – С.34-38.
4. Шойхет, Б.М. Проектирование тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей / Б.М. Шойхет // Энергосбережение. – 2015 – №1. – С.50-55.
5. Уникальный теплоизоляционный пеностекольный материал / Энергосбережение. – 2014 – №7. – С.16-17.
6. Ильин, Р.А. Эффективность применения жидкокристаллической изоляции в тепловых сетях систем теплоснабжения / Р.А. Ильин, Р.Д. Досмухамедов // Евразийское научное Объединение. – 2018. – № 1(37). – С. 54–56.
7. Фокин, К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий // К.Ф. Фокин – М.: АВОК-ПРЕСС, 2006. – 256 с.
8. Токарева, А.Н. Обоснование выбора теплоизоляционных материалов трубопроводов с использованием графического метода / А.Н.Токарева и [др]/ Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. – 2019. – №4(40). – С. 66-73.
9. Дегтярев, Д.А. Пошаговая методика проведения многофакторного эксперимента [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://manyfactors.ru>.

ANALYSIS OF THE USE OF PIPELINES WITH MODERN THERMAL INSULATION MATERIALS FOR THE UNDERGROUND NON-CHANNEL METHOD OF LAYING A HEATING MAIN USING STATISTICAL PROCESSING METHODS

I.V. YUDAEV¹, D. Sc. (tech.)

A.A. SEREGIN², D. Sc. (tech.)

A.N. TOKAREVA², Ph. D. (tech.)

N.N. GRACHEVA², Ph. D. (tech.)

A.N. POSTOVALOV², undergraduate student

¹St. Petersburg State Agrarian University, 2, Peterburgskoye highway, Pushkin, St.Petersburg, 196601, Russia

²Azov-Black Sea Engineering Institute - branch of Don State Agrarian University, 21, Lenina str., Zernograd, 347740, Russia

Abstract. The issues of the use of pipelines with such modern thermal insulation materials as polyurethane foam, reinforced concrete, foam laminate, foam quartz and basalt wool in the heat supply system are considered. For all types of coatings, the dependences of the change in the minimum thickness of the insulation layer on the diameter of the pipeline are established. Based on the results of the implementation of a three-factor machine experiment, the functions of changing heat losses from the diameter and depth of the pipeline laying were determined. The thermophysical characteristics of insulation materials in the underground method of laying do not affect the amount of heat loss.

Key words: pipeline, heat loss, diameter, depth, insulation.

REFERENCES

1. Bashmakov, I.A. Povyshenie energoeffektivnosti v sistemah teplosnabzheniya. Chast' 1. Problemy rossijskikh sistem teplosnabzheniya /I.A. Bashmakov// Energoberezhenie. – 2010 – №2.–S.46-54.
2. Bakaj, S. M. Innovacionnye rezervy snizheniya poter' v teplovyh setyah predpriyatij /S.M.Bakaj, S.O.Kazakova//Upravlenie ekonomikoj: metody, modeli, tekhnologii //Materialy 18 Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii.– UFA, 2018.– S.158-161.
3. Smorodova, O.V. Modelirovanie optimizacii teplovyh poter' pri raspredelenii energonositelej/O.V. Smorodova i [dr] // Energoberezhenie i vodopodgotovka. – 2019 – №1(117). – S.34-38.
4. SHojhet, B.M. Proektirovanie teplovoj izolyacii truboprovodov teplovyh setej / B.M. SHojhet // Energoberezhenie. – 2015 – №1. – S.50-55.
5. Unikal'nyj teploizolyacionnyj penostekol'nyj material / Energoberezhenie. – 2014 – №7. – S.16-17.
6. Il'in, R.A. Effektivnost' primeneniya zhidkokristallicheskoj izolyacii v teplovyh setyah sistem teplosnabzheniya / R.A. Il'in, R.D. Dosmuhamedov // Evrazijskoe nauchnoe Ob"edinenie. – 2018. – № 1(37). – S. 54–56.
7. Fokin, K.F. Stroitel'naya teplotekhnika ograzhdayushchih chastej zdanij // K.F. Fokin – M.: AVOK-PRESS, 2006. – 256 s.
8. Tokareva, A.N. Obosnovanie vybora teploizolyacionnyh materialov truboprovodov s ispol'zovaniem graficheskogo metoda / A.N.Tokareva i [dr] / Chrezvychajnye situacii: promyshlennaya i ekologicheskaya bezopasnost'. – 2019. – №4(40). – S. 66-73.
9. Degtyarev, D.A. Poshagovaya metodika provedeniya mnogofaktornogo eksperimenta [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://manyfactors.ru>.