

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

УДК 662.998

НЕМОВА ТАТЬЯНА НИКОЛАЕВНА, докт. техн. наук,

ст. научный сотрудник,

tatyana.nemova.0702@yandex.ru

ЛЕЖНЕВА ЮЛИЯ АНДРЕЕВНА, ст. преподаватель,

pr-tsuab@mail.ru

ЦВЕТКОВ НИКОЛАЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,

nac.tsuab@yandex.ru

АЛЕКСЕЕВА ЕЛЕНА ГЕННАДЬЕВНА, магистрант,

alexejewa_elena@mail.ru

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Рассмотрены вопросы влияния увлажнения теплоизоляционных материалов, используемых для тепловой защиты магистральных теплопроводов (минеральная вата, пенополиуретан), на тепловые потери. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния увлажнения (частичного, полного) на величину коэффициента теплопроводности исследованных теплоизоляционных материалов. Проведен расчет и сравнительный анализ тепловых потерь с использованием стандартных методик и программного комплекса «ТерлоРоТр-2». Исследование позволило оценить влияние числа циклов увлажнение-высыхание минеральной ваты и пенополиуретана на тепловые потери магистральных теплопроводов.

Ключевые слова: теплоизоляционные материалы; увлажнение; коэффициент теплопроводности; пенополиуретан; тепловые потери.

TATYANA N. NEMOVA, DSc, Senior Scientist,

tatyana.nemova.0702@yandex.ru

YULIA A. LEZHNEVA, Senior Lecturer,

pr-tsuab@mail.ru

NIKOLAY A. TSVETKOV, DSc, Professor,

nac.tsuab@yandex.ru

ELENA G. ALEKSEEVA, Undergraduate Student,
alexeyeva_elena@mail.ru
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia

HEAT LOSSES OF MAIN PIPELINES DEPENDING ON THERMAL CONDUCTIVITY OF INSULATION MATERIALS

The article focuses on the problem of heat losses of main pipelines due to moisture of insulation materials (mineral wool, polyurethane foam). The experimental results concern the moisture (partial, full) effect on thermal conductivity of insulation materials. The calculations and comparative analysis are given for heat losses using the standard techniques and TeploRoTr-2 software system. Research allows estimating the impact of the number of moisture-drying out cycles for mineral wool and polyurethane on heat losses of the main pipelines.

Keywords: insulation materials; moisture; thermal conductivity; polyurethane foam; heat loss.

Введение

В последнее время как нельзя более актуальными стали вопросы, связанные с энергосбережением в различных областях техники и строительства [1]. Одной из проблем энергосбережения в сфере поставки тепловой энергии потребителю являются высокие тепловые потери при эксплуатации магистральных тепловых сетей [2], которые, по мнению специалистов, могут достигать 35–50 %.

Определение фактических тепловых потерь – важнейшая задача теплоснабжения, т. к. теплоснабжающие организации в России в большинстве своем, не зная фактических тепловых потерь, используют некие нормативные характеристики. В европейских странах потери тепловой энергии определяются разницей суммарных показаний приборов учета производителей и потребителей тепла.

Анализ возможных причин возникновения тепловых потерь в магистральных тепловых сетях показал [3, 4], что немаловажную роль при этом играет состояние тепловой изоляции теплопроводов. Не является секретом тот факт, что вследствие нарушения технологии монтажа теплоизоляции при проведении монтажных и ремонтных работ теплофизические характеристики теплоизолирующего слоя не соответствуют фактическим. При эксплуатации магистральных инженерных сетей в результате аварии возможно механическое разрушение теплоизоляции труб и затопление (подтопление) теплотрасс грунтовыми водами или теплоносителем из теплосетей, что также приводит к существенному изменению теплофизических характеристик теплоизоляции [3–5] и повышению тепловых потерь.

В современной научно-технической литературе, освещающей вопросы теплоснабжения, основное внимание уделяется методикам определения тепловых потерь с учетом особенностей тепловой магистрали. Достаточно широко используется математическое моделирование [4, 5], однако без результатов натуральных экспериментов трудно говорить о применимости той или иной математической модели к оценке конкретной тепловой сети.

Известны работы [6, 7] с результатами численных и экспериментальных исследований по влиянию увлажнения тепловой изоляции трубопроводов (минеральной ваты, пенополиуретана) и грунта на время установления стационарного теплового режима и тепловые потери подземных теплотрасс. При увлажнении теплоизоляции стационарный режим наступает на 4–4,5 ч позже по сравнению с сухой теплоизоляцией, а тепловые потери теплопровода возрастают на 65 %.

Повышение объемной влажности грунта до 30 % [7] приводит к увеличению тепловых потерь для обратного теплопровода в 3 раза, для подающего – в 1,85 раза, при этом суммарные тепловые потери составляют около 200 %.

Основные результаты были получены авторами при использовании в качестве теплоизолятора минеральной ваты как наиболее популярного для тепловой изоляции материала, однако в настоящее время достаточно широко используются скорлупы, изготовленные из пенополиуретана, полистирола и других пористых теплоизоляционных материалов. Кроме того, увлажнение минеральной ваты (тем более полное) сопровождается существенным изменением размеров материала, который после полного высыхания не сохраняет своих физических и теплофизических свойств [3]. Поэтому приведенные результаты применимы только при однократном увлажнении.

Полученные численные и экспериментальные данные могут быть использованы для оценки влияния объемной влажности грунта и изоляции на изменение величины коэффициента теплопроводности, а следовательно, и на величину тепловых потерь. Однако для создания физических и математических моделей процессов тепломассообмена в теплоизоляционных пористых материалах при различных условиях эксплуатации необходимо планомерное накопление знаний по проблеме.

В настоящей работе представлены результаты численного и экспериментального исследования влияния на величину коэффициента теплопроводности ряда теплоизоляционных материалов, применяемых при монтаже и ремонте инженерных сетей различного диаметра, некоторых условий эксплуатации (увлажнение).

Экспериментальные исследования

В качестве объектов исследования использовались пластины и трубы, изготовленные из минеральной (или базальтовой) ваты и пенополиуретана (ППУ). Увлажнение материалов осуществлялось равномерным введением в материал определенного количества воды по разработанной авторами методике [Там же]. Для оценки способности материалов поглощать влагу образцы предварительно размещались над водой (не касаясь ее) в закрытых сосудах. За время эксперимента не было отмечено увеличения массы образцов вследствие поглощения влаги из воздуха. Совсем другая картина наблюдалась при помещении образцов непосредственно в воду. Образец минеральной ваты мгновенно намокал, увеличивая свой вес в 17 раз, а масса образца пенополиуретана при сохранении целостности поверхностного слоя через сутки увеличивалась только на 8 %. При этом пенополиуретан вследствие жесткой структуры после высыхания сохранял свои физические размеры, а минеральная вата существенно изменяла объем (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид образца из минеральной ваты. Слева направо: материал в сухом состоянии; после естественного высыхания; в состоянии полного насыщения водой

Значения коэффициентов теплопроводности материалов рассчитывались на основании полученных экспериментально значений температур на изотермических поверхностях образца и теплового потока, проходящего через материал при стационарных тепловых условиях. Методика проведения экспериментов приведена в работе [3]. Погрешность не превышала 9 %.

В табл. 1 представлены определенные по полученным экспериментальным данным значения коэффициентов теплопроводности минеральной ваты и пенополиуретана в сухом, увлажненном состоянии, при полном затоплении водой, после полного естественного высыхания. Приведены средние значения коэффициента теплопроводности и соответствующий обработанным экспериментальным данным диапазон искомого параметра.

Таблица 1

Коэффициенты теплопроводности минеральной ваты и пенополиуретана

Теплоизоляционный материал	Образец	Состояние образца	$\lambda_{\text{ср}}$, Вт/(м·К)	λ , Вт/(м·К)
Минеральная вата	Пластина	Сухой	0,053	0,048–0,058
		Влажный	0,061	0,046–0,077
	Труба	Сухой	0,053	0,05–0,056
		Полное высыхание	0,11	0,086–0,134
Пенополиуретан	Пластина	Сухой	0,047	0,041–0,053
		Влажный	0,067	0,053–0,081
	Труба	Сухой	0,047	0,043–0,051
		Полное затопление	0,15	0,08–0,22
		Полное высыхание	0,05	0,047–0,053

Из данных таблицы следует, что при увлажнении коэффициент теплопроводности материалов увеличивается, его наибольшее значение соответствует полному намоканию образца. Образец минеральной ваты в отличие от ППУ не восстанавливает свои теплофизические характеристики после полного высыхания.

Следует заметить, что значения коэффициентов теплопроводности исследованных теплоизоляционных материалов по литературным данным находятся в довольно широком диапазоне, вследствие чего априори при проведении исследований необходимо для каждой партии теплоизоляционных материалов проводить контрольные определения коэффициента теплопроводности в сухом состоянии. Это тем более важно, что на рынке теплоизоляционных материалов появляется продукция, не соответствующая требованиям потребителей, которую очень сложно идентифицировать.

При эксплуатации магистральных и квартальных теплопроводов зачастую происходит многократное затопление (подтопление) инженерных систем, сопровождаемое цикличностью процессов затопление-полное высыхание теплоизоляционных материалов. Оценка тепловых потерь в этих случаях должна учитывать реальное изменение величин теплопроводности теплоизоляционных материалов в результате такого процесса.

Были проведены экспериментальные исследования, и получена динамика изменения коэффициента теплопроводности базальтовой ваты (табл. 2) и пенополиуретана (табл. 3) в зависимости от числа циклов затопление-полное высыхание в естественных условиях.

Таблица 2

Влияние числа циклов увлажнение-высыхание на величину коэффициента теплопроводности базальтовой ваты

Состояние образца	$\lambda_{\text{ср}}$, Вт/(м·К)	λ , Вт/(м·К)
Сухой	0,0584	0,0546–0,0622
1-й цикл	0,0888	0,0825–0,0950
2-й цикл	0,0966	0,0906–0,1026
3-й цикл	0,0990	0,0930–0,1050
4-й цикл	0,0993	0,0934–0,1052
5-й цикл	0,0993	0,0934–0,1052

Таблица 3

Влияние числа циклов увлажнение-высыхание на величину коэффициента теплопроводности пенополиуретана

Состояние образца	$\lambda_{\text{ср}}$, Вт/м·К	λ , Вт/м·К
Сухой	0,0454	0,0441–0,0468
1-й цикл	0,0548	0,0548–0,0548
2-й цикл	0,0551	0,0551–0,0551
3-й цикл	0,0550	0,0547–0,0553

Увеличение значений коэффициента теплопроводности базальтовой ваты от числа циклов обусловлено, как было отмечено выше, изменением физических параметров образцов (размеры, пористость) вследствие увлажнения. Однако после третьего цикла теплопроводность материала не изменяется.

Для образцов из пенополиуретана, не изменивших свои физические параметры (размеры, пористость) после нескольких циклов увлажнение-высы-

хание в естественных условиях, на основании экспериментальных результатов отмечено незначительное увеличение значения коэффициента теплопроводности, что может быть объяснено попаданием влаги в микропоры.

Расчет тепловых потерь в системах теплоснабжения

Оценка тепловых потерь в системах теплоснабжения в условиях их эксплуатации и проведение математического моделирования тепловых режимов теплотрубопроводов в различных условиях эксплуатации связаны со значительными материальными и временными затратами, которые могут быть существенно снижены при использовании специальных программных комплексов, позволяющих оптимизировать работу специалистов. Однако при этом возникает вопрос о достоверности полученных результатов.

Рассмотрена возможность использования для расчета тепловых потерь в магистральных теплотрубопроводах с различными теплоизоляционными материалами программного комплекса «ТерлоRoTг-2» (версия 2012 г.), находящегося в открытом доступе. Программа позволяет рассчитать тепловые потери через изоляцию теплотрубопроводов при различных способах прокладки трубопровода, а также провести расчеты одноходовых теплообменников «труба в трубе», потерь давления на элементах узлов учета тепла, радиационно-конвективных щелевых рекуператоров промышленных печей, ограждений с теплопроводными включениями.

При анализе рассматривался широко применяемый в России магистральный теплотрубопровод диаметром 0,6 м, изолированный ППУ скорлупами толщиной 0,05 м, в непроходном железобетонном канале марки КЛс120-120 подземной прокладки. Средняя температура теплоносителя принималась равной 100–130 °С, а температура на поверхности грунта – 10 °С.

При канальной прокладке теплотрубопровода тепловые потери можно определить из уравнения теплового баланса [8, 9], в котором общим тепловым потерям в канале соответствуют тепловые потери из канала в окружающую среду:

$$\frac{\tau - t_k}{R_l}(1 + \beta) = \frac{t_k - t_n}{R_{l\text{кан}}}, \quad (1)$$

где τ – средняя температура теплоносителя, °С; t_k – средняя температура воздуха в канале, °С; t_n – температура окружающей среды над поверхностью канала, °С; $(1 + \beta)$ – коэффициент местных потерь, учитывающий дополнительные потери тепла опорами, арматурой и компенсаторами [8], для выбранного диаметра трубопровода, равный 1,15; R_l – полное термическое сопротивление изолированного трубопровода, (м·К)/Вт; $R_{l\text{кан}}$ – суммарное термическое сопротивление канала и грунта вокруг канала, (м·К)/Вт.

Для решения уравнения теплового баланса были определены следующие показатели: общее термическое сопротивление трубопровода; термическое сопротивление конструкции канала; термическое сопротивление грунта вокруг канала; термическое сопротивление от воздуха к стенкам канала; общее термическое сопротивление канала; средняя температура воздуха в канале.

Результаты расчетов тепловых потерь в рассматриваемом теплотрубопроводе с использованием программного комплекса «ТерлоРоТг-2» и из решения уравнения теплового баланса представлены в табл. 4. Здесь же для сравнения приведены данные, полученные в работе [4] при математическом моделировании тепловых режимов инженерных сетей для аналогичных условий эксплуатации.

Таблица 4

Результаты расчета тепловых потерь

Температура теплоносителя, °С	Тепловые потери, рассчитанные		
	по программе «ТерлоРоТг-2», Вт/м	по уравнению теплового баланса, Вт/м	по математической модели [4], Вт/м
100	70,1	69,11	68,42
110	77,9	78,11	77,34
120	85,7	87,13	86,26
130	93,5	95,85	95,18

Сравнение показывает, что полученные результаты хорошо согласуются как между собой, так и с результатами работы [4]. Расхождение не превышает 2,5 %, что может быть обусловлено погрешностью задания исходных данных для расчета и погрешностью результатов работы [4].

Так как использование программного комплекса позволяет существенно сократить время расчетов, а проведенное сравнение с результатами других авторов показало адекватность и достоверность полученных с его помощью результатов, в дальнейшем расчеты тепловых потерь проводились с применением комплекса «ТерлоРоТг-2».

Влияние теплопроводности теплоизоляционных материалов на тепловые потери

Выше было отмечено, что увлажнение теплоизоляционных материалов, применяемых в системах теплоснабжения, вследствие аварийных ситуаций [2, 3] приводит к значительному увеличению коэффициента теплопроводности этих материалов и, как следствие, к дополнительным и весьма существенным тепловым потерям на инженерных сетях.

С помощью программного пакета «ТерлоРоТг-2» и полученных авторами экспериментальных данных по исследованию влияния увлажнения теплоизоляционных материалов [3], применяемых в магистральных тепловых сетях, на их теплофизические свойства была проведена оценка теплотерь в трубопроводе для разной степени затопления.

В качестве объекта исследования выбран стальной теплотрубопровод (рис. 2) диаметром 0,6 м и толщиной стенки 0,01 м (коэффициент теплопроводности стали принимался равным 50 Вт/(м·К)), изолированный: базальтовой ватой толщиной 0,07 м с защитным покрытием из асбестоцементных сборных скорлуп толщиной 0,008 м (коэффициент теплопроводности защитного покрытия равен 0,0583 Вт/(м·К)); пенополиуретановыми скорлупами толщиной 0,06 м.

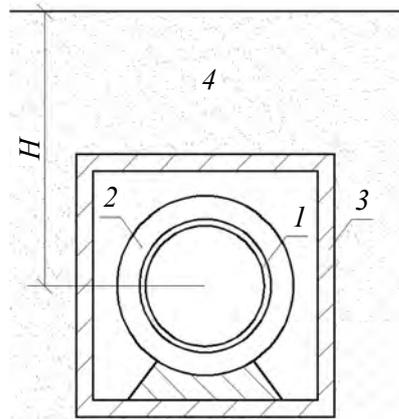


Рис. 2. Схема расположения трубопровода в непроходном канале подземной прокладки: H – глубина залегания к горизонтальной оси; 1 – металлическая стенка трубы; 2 – слой изоляции; 3 – железобетонная стенка канала; 4 – грунт

Значения коэффициента теплопроводности теплоизоляционных материалов для трёх случаев затопления теплотрассы (на четверть, на половину и полностью), а также для случая, когда теплоизоляционный материал после полного увлажнения высыхал в естественных условиях, представлены в табл. 2, 3 и в работе [3]. Температура окружающей среды для Томска принималась равной минус $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ¹.

Результаты расчета тепловых потерь при значениях коэффициента теплопроводности, соответствующих условиям эксплуатации системы теплоснабжения с изоляцией базальтовыми матами, представлены на рис. 3.

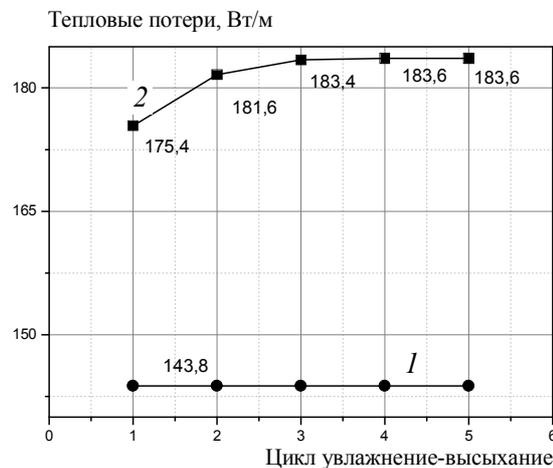


Рис. 3. Тепловые потери трубопровода подземной прокладки, изолированного базальтовыми матами, с учетом числа циклов увлажнения-высыхания: 1 – сухой материал; 2 – материал после цикла увлажнения-высыхания

¹ СНиП 23-01-99. Строительная климатология. М.: Госстрой России, 2000. 57 с.

Анализ результатов показал, что тепловые потери трубопровода, изолированного базальтовой ватой, даже при его полном высыхании после затопления возросли по сравнению с соответствующим параметром для сухого материала теплоизолятора. После третьего цикла увлажнение-высыхание тепловые потери увеличились в 1,3 раза по сравнению с сухим материалом и при дальнейшем увеличении числа циклов не изменялись.

Тепловые потери при полном затоплении трубопровода, изолированного ППУ скорлупами, в каждом цикле возрастают в 1,1 раза при затоплении, а после полного высыхания возвращаются к первоначальным значениям (табл. 5).

Таблица 5

Тепловые потери трубопровода, изолированного пенополиуретаном

Состояние материала	Сухой	Полное затопление	Полное высыхание
Тепловые потери, Вт/м	142,4	158,4 ± 0,21	142,4

Заключение

Увлажнение исследованных в работе теплоизоляционных материалов приводит к увеличению их коэффициентов теплопроводности, а следовательно, и к повышению тепловых потерь в магистральных трубопроводах. Минеральная (базальтовая) вата после высыхания не восстанавливает своих физических и теплофизических свойств, а цикличность процессов увлажнение-высыхание теплоизолятора увеличивает тепловые потери в 1,3 раза. Для трубопровода с изоляцией пенополиуретановыми скорлупами тепловые потери даже при полном затоплении теплотрассы увеличиваются незначительно, восстанавливаясь при высыхании теплоизолятора до первоначальных значений. Поэтому при ремонте участков тепловых сетей с подтоплением трубопроводов следует использовать пенополиуретановую тепловую изоляцию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Автоматизированная гетерогенная система диспетчеризации и управления потреблением энергоресурсов / Н.А. Цветков, Ю.О. Кривошеин, А.Н. Хуторной, А.В. Колесникова, Ф.В. Саврасов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 5 (52). – С. 138–150.
2. Балувев, Е.Д. Перспективы развития централизованного теплоснабжения / Е.Д. Балувев // Теплоэнергетика. – 2001. – № 11. – С. 50–54.
3. Влияние увлажнения теплоизоляции на тепловые потери в системах теплоснабжения / Ю.А. Воронина, Т.Н. Немова, К.Д. Трофимов, Н.А. Цветков // Изв. вузов. Физика. – 2010. – № 12/2. – С. 63–69.
4. Половников, В.Ю. Математическое моделирование тепловых режимов теплотрубопроводов в условиях увлажнения изоляции : дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2006. – 122 с.
5. Кузнецов, Г.В. Математическое моделирование процессов теплогазопереноса в тепловой изоляции трубопроводов / Г.В. Кузнецов, В.Ю. Половников // Энергосбережение и водоподготовка. – 2007. – № 6. – С. 37–39.
6. Николаенко, Р.А. Влияние увлажнения тепловой изоляции на величину тепловых потерь тепловых сетей / Р.А. Николаенко, М.В. Ермоленко, О.А. Степанова // Молодой ученый. – 2014. – №6. – С. 207–210.

7. Иванов, В.В. Влияние увлажнения изоляции и грунта на тепловые потери подземных теплотрасс / В.В. Иванов, Н.В. Букаров, В.В. Василенко // Новости теплоснабжения. – 2002. – № 7. – С. 32–33.
8. Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей / под ред. А.А. Николаева. – Курган : Интеграл, 2012. – 360 с.
9. Теплоснабжение / А.А. Ионин, Б.М. Хлыбов, В.Н. Братенков, Е.Н. Терлецкая ; под ред. А.А. Ионина. – М. : Стройиздат, 182. – 336 с.

REFERENCES

1. Tsvetkov N.A., Krivoshein J.O., Khutornoi A.N., Kolesnikov A.V., Savrasov F.V. Avtomatizirovannaya geterogennaya sistema dispatcherizatsii i upravleniya potrebleniem energoresursov [Automated heterogeneous system of dispatch of and control for energy consumption]. *Vestnik TSUAB*. 2015. No. 5. Pp. 138–150. (rus)
2. Baluev E.D. Perspektivy razvitiya tsentralizovannogo teplosnabzheniya [Development prospects of centralized heat supply]. *Thermal Engineering*. 2001. No. 11. Pp. 50–54. (rus)
3. Voronina Y.A., Nemova T.N., Trofimov K.D., Tsvetkov N.A. Vliyanie uvlazhneniya teploizolyatsii na teplovye poteri v sistemakh teplosnabzheniya [Moisture impact on heat insulation and losses in heat supply systems]. *Russian Physics Journal*. 2010. No. 12/2. Pp. 63–69. (rus)
4. Polovnikov V.Y. Matematicheskoe modelirovanie teplovykh rezhimov teplotruboprovodov v usloviyakh uvlazhneniya izolyatsii: dis. ... kand. tekhn. nauk [Mathematical modeling of thermal modes heat pipelines in moisture conditions. PhD Thesis]. Tomsk, 2006. 122 p. (rus)
5. Kuznetsov G.V., Polovnikov V.Y. Matematicheskoe modelirovanie protsessov teplo-lagoperenosa v teplovoi izolyatsii truboprovodov [Mathematical modeling of heat and moisture transfer processes in pipelines heat insulation]. *Energoberezhenie i vodopodgotovka*. 2007. No. 6. Pp. 37–39. (rus)
6. Nikolaenko R.A., Ermolenko M.V., Stepanova O.A. Vliyanie uvlazhneniya teplovoi izolyatsii na velichinu teplovykh poter' teplovykh setei [Influence of moisture on the thermal insulation value of the heat losses of heat networks]. *Molodoi uchenyi*. 2014. No. 6. Pp. 207–210. (rus)
7. Ivanov V.V., Bukarov N.V., Vasilenko V.V. Vliyanie uvlazhneniya izolyatsii i grunta na teplovye poteri podzemnykh teplotrass [Moisture and soil effect on heat losses in underground heat mains]. *Novosti teplosnabzheniya*. 2002. No. 7. Pp. 32–33. (rus)
8. Nikolaev A.A. Spravochnik proektirovshchika. Proektirovanie teplovykh setei [Designer manual. Design of heat networks]. Kurган: Integral, 2012. 360 p. (rus)
9. Ionin A.A., Khlybov B.M., Bratenkov V.N., Terletskaia E.N. Teplosnabzhenie [Heat supply]. Moscow: Stroyizdat Publ., 182. 336 p. (rus)