

Особенности проектирования наружных тепловых сетей в Арктической зоне

Рецензия эксперта на статью получена 25.11.2021 [The expert review of the article received on November 25, 2021].

Тепловая изоляция трубопроводов тепловых сетей имеет огромное значение в проектировании, строительстве и эксплуатации инженерных объектов, особенно в вопросах снижения потерь теплоты, повышения энергоэффективности систем теплоснабжения и обеспечения требуемых условий эксплуатации. Особенно актуально обеспечение требуемых условий эксплуатации тепловых сетей, расположенных в районах Крайнего Севера, в районах расположения вечномёрзлых грунтов.

Большая часть (свыше 60%) территории Российской Федерации находится в зоне действия криолитозоны — вечномёрзлых грунтов (рис. 1) [1], начиная от берегов морей Северного Ледовитого океана, а именно Баренцева, Белого, Карского, Восточно-Сибирского и Чукотского морей, а также моря Лаптевых.

Глубина промерзания таких грунтов колеблется от нескольких сантиметров до 2–2,5 м в зависимости от температуры наружного воздуха. В средних широтах промерзанию подвержен небольшой поверхностный слой, называемый сезонной мерзлотой. В северных широтах за долгую, морозную зиму земля промерзает очень глубоко, и коротким летом она оттаивает лишь с поверхности на 0,5–2 м в глубину. Ниже оттаивающего слоя круглый год сохраняются отрицательные температуры, то есть расположены вечномёрзлые грунты.

К трубопроводам тепловых сетей, расположенным в зоне действия вечномёрзлых грунтов, предъявляются дополнительные требования по их прокладке и проектированию, которые необходимо выполнять с учётом прогноза изменения мерзлотно-грунтовых условий и принятого принципа использования вечномёрзлых грунтов как оснований проектируемых и эксплуатируемых зданий и сооружений, и необходимости проведения мероприятий по сохранению устойчивости конструкций тепловых сетей [2].

Большая территория России находится в зоне действия вечномёрзлых грунтов, начиная от берегов морей Северного Ледовитого океана, то есть Баренцева, Белого, Карского, Восточно-Сибирского и Чукотского морей, а также моря Лаптевых

При наземной прокладке тепловые сети должны предусматриваться на эстакадах, низких или высоких отдельно стоящих опорах, а также в наземных каналах, расположенных на поверхности земли (рис. 2). Свайные основания трубопроводов в районах распространения вечномёрзлых грунтов выполняются из свай заводского изготовления (рис. 2).

Наиболее важными показателями, по которым выбирается тот или иной теплоизоляционный материал для применения на участках трубопроводов тепловой сети, являются [3]: коэффициент теплопроводности, плотность, группа горючести и температурный режим эксплуатации.

Сравнительные характеристики теплоизоляционных материалов приведены в табл. 1. Все рассмотренные материалы соответствуют требованиям, предъявляемым современными нормами [2, 3].

По показателю коэффициента теплопроводности (без учёта температуры теплоносителя), наиболее эффективными являются четыре теплоизоляционных материала: пенополиуретан (ППУ) [коэффициент теплопроводности в сухом состоянии при 20 °С от 0,024 до 0,034 Вт/(м·°С)], пенополиминерал (ППМ) [от 0,043 до 0,047 Вт/(м·°С)], вспененный каучук [от 0,034 Вт/(м·°С)] и каменная (базальтовая) вата [от 0,032 до 0,046 Вт/(м·°С)].

Как теплоизоляционный материал лидирующее положение по теплофизическим характеристикам занимает пенополиуретан, однако по показателю долговечности и экономичности он значительно уступает каменной вате.

УДК 697.34. Номер научной специальности: 05.23.03.

Особенности проектирования наружных тепловых сетей в Арктической зоне

Е. А. Бирюзова, к.т.н., доцент, кафедра «Теплогасоснабжение и вентиляция», Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)

Повышение энергоэффективности тепловой сети за счёт применения качественных теплоизоляционных материалов является важной задачей. Применение таких теплоизоляционных конструкций позволит существенно экономить тепловую энергию, особенно в Арктической зоне, а главное — защищать от теплового воздействия мёрзлый грунт, предотвращая его оттаивание.

Ключевые слова: тепловые сети, материалы тепловой изоляции, вечномёрзлые грунты Арктической зоны, толщина тепловой изоляции.

UDC 697.34. The number of scientific specialty: 05.23.03.

Features of the design of external heating networks in the Arctic zone

E. A. Biryuzova, PhD, Associate Professor, Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)

Improving the energy efficiency of the heating network through the use of high-quality thermal insulation materials is an important task. The use of such heat-insulating structures will significantly save thermal energy, especially in the Arctic zone, and most importantly, protect frozen soil from thermal effects, preventing it from thawing.

Key words: heating networks, thermal insulation materials, permafrost soils of the Arctic zone, thermal insulation thickness.

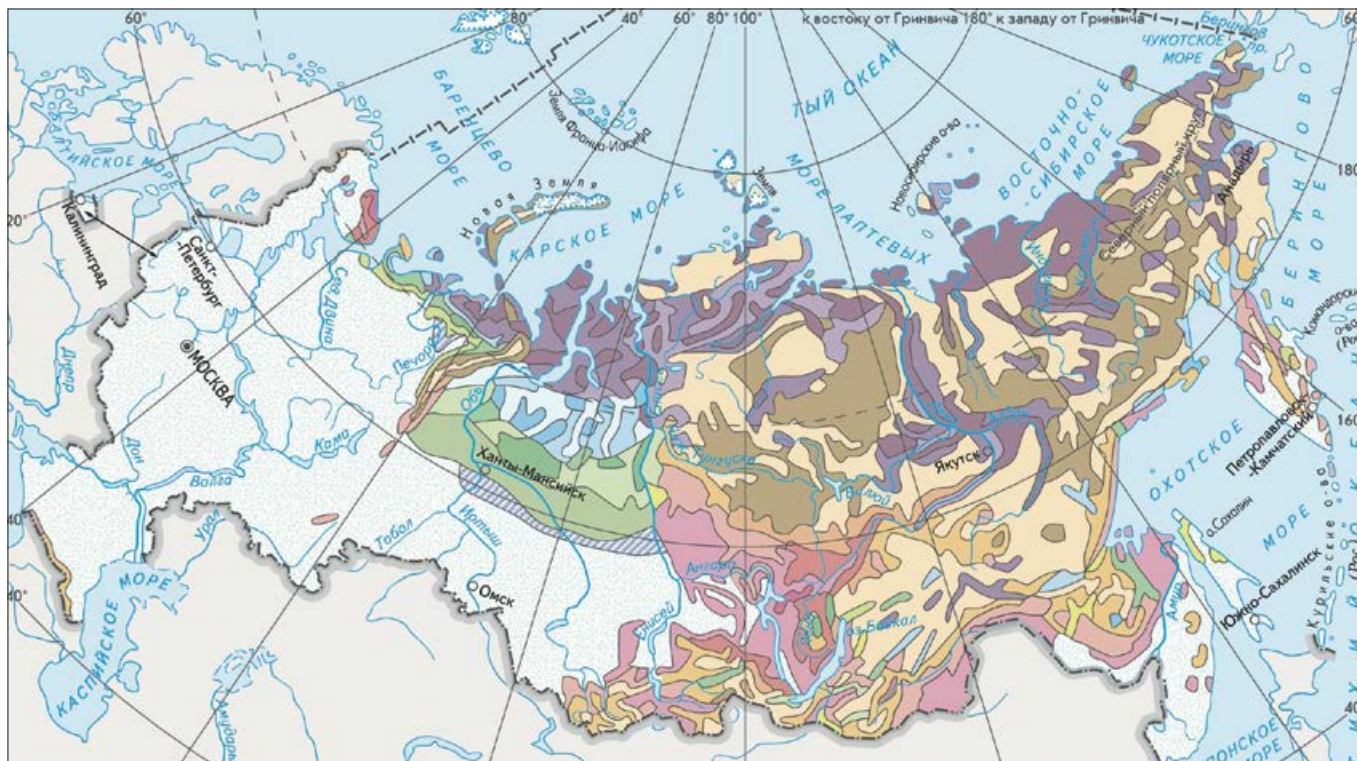


Рис. 1. Карта распространения многолетнемерзлых пород (криолитозоны) на территории Российской Федерации (масштаб 1:45 000 000) [1]

Льдистость / распространение многолетнемерзлых пород	Равнины, межгорные впадины				Горы, высокие равнины, хребты, плато			
	сплошное (90–100 %)	прерывистое (50–90 %)	спорадическое (10–50 %)	островное (0–10 %)	сплошное (90–100 %)	прерывистое (50–90 %)	спорадическое (10–50 %)	островное (0–10 %)
Высокая (более 20 %, для горных районов от 10 %)								
Средняя (10–20 %)								
Низкая (0–10 %)								
Реликтовые многолетнемерзлые породы								

Данная исследовательская работа была выполнена при поддержке Научно-образовательного центра мирового уровня «Российская Арктика: новые материалы, технологии и методы исследования». Расчёт толщины тепловой изоляции выполнялся по нормируемой плотности теплового потока для климатических условий города Якутска. Проведём сравнительный анализ полученных результатов расчёта при применении следующих тепло-

изоляционных материалов: пенополиуретана и минеральной ваты (табл. 2 и 3).

Полученные результаты позволяют сделать вывод о наибольшей эффективности материала пенополиуретана, при использовании которого получена наименьшая толщина тепловой изоляции. В то же время толщина изоляции, рекомендуемая [4, 5] (табл. 4), меньше требуемых расчётных значений, полученных по результатам расчёта.

При определении наибольшего температурного влияния на мерзлый грунт была рассчитана температура на поверхности теплоизоляционной конструкции при наибольшей температуре воздуха наиболее жаркого месяца [6–11]. Результаты расчёта приведены в табл. 5. Полученное значение температуры на поверхности тепловой изоляции имеет небольшое превышение над температурой окружающей среды и составляет 1,307–0,548 °C.

Сводная таблица технических характеристик теплоизоляционных материалов табл. 1

Свойства	Каменная вата	ППУ	Вспененный каучук	ППМ	ТТМ-В
Плотность, кг/м³	40–210	60	50–70	270	200–310
Теплопроводность, Вт/(м·°C)	от 0,038 до 0,045	0,033	от 0,038 до 0,043	от 0,035 до 0,041	0,054
Водопоглощение по объёму, %	12–30	1–3	1–3	0,5	15–50
Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)	от 0,25 до 0,3	от 0,02 до 0,05	от 0,02 до 0,07	0,17	0,012
Прочность на сжатие, МПа	4–60	0,2	1	1,2	2–5
Группа горючести	НГ, Г1	Г3–Г4	Г1	Г4	НГ
Группа воспламеняемости	В1	В3	В2	В2	–
Группа дымообразующей способности	Д1	Д3	Д3	Д2	–
Температурный режим эксплуатации, °C	от –60 до +400	от –70 до +150	от –50 до +110	до +150	от –20 до +250
Токсичность	Т1	Т3	Т2	Т3	–
Долговечность, лет	50	30	25	30	15
Цена, руб/п.м.	199	604	696	696	849

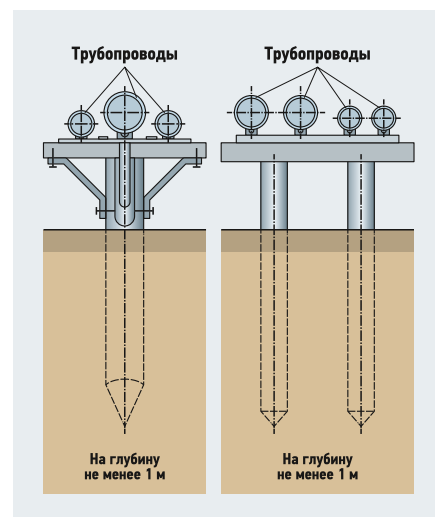


Рис. 2. Схема надземной прокладки трубопроводов на общих свайных опорах

Расчёт толщины ППУ при надземной прокладке трубопроводов

табл. 2

Тр/д	под.	обр.	под.	обр.	под.	обр.	под.	обр.
δ , м	0,081	0,085	0,074	0,093	0,065	0,091	0,053	0,090
$d_{н.}$, м	0,377	0,377	0,325	0,325	0,273	0,273	0,219	0,219
B	1,429	1,452	1,457	1,575	1,475	1,664	1,487	1,823
$d_{н.}$, м	0,539	0,548	0,474	0,512	0,403	0,454	0,326	0,399
$\ln(B)$	0,357	0,373	0,377	0,454	0,389	0,509	0,397	0,600
B'	1,429	1,452	1,457	1,575	1,475	1,664	1,487	1,823
λ_k	0,03975	0,03975	0,03975	0,03975	0,03975	0,03975	0,03975	0,03975
r_{tot}	1,456	1,521	1,538	1,849	1,591	2,074	1,629	2,444
α_1	26,0	26	26	26	26	26	26	26
t_T	65	45	65	45	65	45	65	45
t_w	90	50	90	50	90	50	90	50
t_c	-15,69	-15,69	-15,69	-15,69	-15,69	-15,69	-15,69	-15,69
q_l	75,6	45	71,6	37	69,2	33	67,6	28
K_1	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
$r_{tot'}$	1,453	1,517	1,535	1,845	1,589	2,068	1,628	2,436

Расчёт толщины минеральной ваты при надземной прокладке трубопроводов

табл. 3

Тр/д	под.	обр.	под.	обр.	под.	обр.	под.	обр.
δ , м	0,129	0,119	0,119	0,133	0,104	0,130	0,086	0,132
$d_{н.}$, м	0,377	0,377	0,325	0,325	0,273	0,273	0,219	0,219
B	1,685	1,633	1,733	1,817	1,765	1,954	1,786	2,202
$d_{н.}$, м	0,635	0,616	0,563	0,591	0,482	0,533	0,391	0,482
$\ln(B)$	0,522	0,491	0,550	0,597	0,568	0,670	0,580	0,789
B'	1,685	1,633	1,733	1,817	1,765	1,954	1,786	2,202
λ_k	0,05805	0,05225	0,05805	0,05225	0,05805	0,05225	0,05805	0,05225
r_{tot}	1,456	1,521	1,538	1,849	1,591	2,074	1,629	2,444
α_1	26	26	26	26	26	26	26	26
t_T	65	45	65	45	65	45	65	45
t_w	90,0	50	90	50	90	50	90	50
t_c	-15,69	-15,69	-15,69	-15,69	-15,69	-15,69	-15,69	-15,69
q_l	75,6	45	71,6	37	69,2	33	67,6	28
K_1	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
$r_{tot'}$	1,450	1,515	1,531	1,841	1,584	2,064	1,622	2,431

Рекомендуемые размеры толщины тепловой изоляции ППУ

табл. 4

$d_{н.}$, мм	Тип 2 ППУ в ПЗ		расчётная толщина слоя ППУ	ППУ в стальной оболочке		расчётная толщина слоя ППУ
	средний наружный диаметр изолированных труб			средний наружный диаметр изолированных труб		
219	355* ¹	10,4* ²	62,0	315* ¹	0,7* ³	47,3
273	450* ¹	13,2* ²	81,5	400* ¹	0,8* ³	62,7
325	500* ¹	14,6* ²	79,5	450* ¹	0,8* ³	61,7
426	600; 630* ¹	16,3* ²	77,8; 92,5	560* ¹	1,0* ³	66,2

Определение температуры на поверхности теплоизоляции конструкции

табл. 5

Расчётные значения	участок 1		участок 2		участок 3		участок 4	
	под.	обр.	под.	обр.	под.	обр.	под.	обр.
q	50,91	22,88	48,16	18,84	46,44	16,81	45,19	14,27
$t_{п}/t_o$	90	50	90	50	90	50	90	50
t_o	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
R_1/R_2	1,479	1,543	1,564	1,873	1,621	2,101	1,666	2,475
$t_{пов}$	16,007	15,287	16,088	15,243	16,225	15,252	16,435	15,248
R_{tot}	1,453	1,517	1,535	1,845	1,589	2,068	1,628	2,436
$R_{пс}$	0,026	0,026	0,029	0,029	0,033	0,033	0,038	0,038
α_1	26	26	26	26	26	26	26	26
d	0,377	0,377	0,325	0,325	0,273	0,273	0,219	0,219

*¹ Номинальное значение. *² Величина отклонения. *³ Толщина оболочки.

Итак, лидирующее положение по теплофизическим характеристикам занимает ППУ, уступающая каменной вате по долговечности и экономичности

Заключение

Чтобы получить рекомендуемые [3, 4] толщины теплоизоляционного материала (ППУ), а также для полного предотвращения температурного влияния на мерзлый грунт, которое может передаваться от теплоизолированной конструкции по поверхности опор на основание, предлагается внести коррективы по величине коэффициента теплопроводности применяемых теплоизоляционных материалов, за счёт его уменьшения.

Полученное расчётным путём оптимальное значение коэффициента теплопроводности теплоизоляционного материала не превышает 0,030 Вт/(м·°C) с учётом температуры теплоносителя. ●

1. Котляков В.М. Многолетняя мерзлота: Большая российская энциклопедия. Том «Россия». С. 63–65 // БРЭ. В 35 т. плюс том «Россия». — М.: Изд-во «Большая российская энциклопедия», 2004–2017. 27 957 с.
2. СП 124.13330.2012. Тепловые сети. Актуализ. ред. СНиП 41-02-2003 (введ. 01.01.2013).
3. СП 61.13330.2012. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Актуализ. ред. СНиП 41-03-2003 (с изм. №1, введ. 01.01.2013).
4. ГОСТ 30732-2006. Трубы и фасонные изделия стальные с тепловой изоляцией из пенополиуретана в полиэтиленовой оболочке. ТУ. — М.: Стандартинформ. 2007. 47 с.
5. Бирюзова Е.А., Глуханов А.С., Кобелев Н.С. Применение современных трубопроводных систем при проектировании и реконструкции тепловых сетей // Известия ЮЗГУ. Серия: Техника и технологии, 2012. №2. С. 63–68.
6. Бирюзова Е.А. Коэффициент теплопроводности как основная характеристика эффективности применения материала тепловой изоляции в теплоснабжении / Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Сб. мат. Всеросс. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных с межд. участием (18–21 декабря 2012 года). — Екатеринбург: УрФУ, 2012. С. 37–40.
7. Бирюзова Е.А., Глуханов А.С. Исследование особенностей выбора способа прокладки тепловых сетей, влияющих на их энергоэффективность // Известия ЮЗГУ. Серия: Техника и технологии, 2020. №4. С. 29–41.
8. Biryuzova E.A., Glukhanov A.S. Improving energy efficiency and reliability of heating networks through the use of multilayer thermal insulation structures. International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2020). September 2020. Sochi, Russia. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 962. Issue 3.
9. Бирюзова Е.А., Глуханов А.С. Влияние способа прокладки трубопроводов на энергоэффективность тепловой сети // Вестник ПНИПУ. Серия: Строительство и архитектура, 2019. №4. С. 59–66.
10. Бирюзова Е.А., Глуханов А.С. Эксплуатационные исследования теплоизоляционных конструкций тепловых сетей объектов наземной космической инфраструктуры // Труды ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. Вып. 663. С. 17–22.
11. Бирюзова Е.А. Повышение энергоэффективности тепловых сетей за счёт применения современных теплоизоляционных материалов // Региональная архитектура и строительство, 2013. №1. С. 62–66.

References — see page 78.

Features of the design of external heating networks in the Arctic zone.
Pp. 22–24.

Elena A. Biryuzova, PhD, Associate Professor, Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)

1. V.M. Kotljakov. *Mnogoletnjaja merzlota* [The permafrost]. *Bol'shaja Rossijskaja jenciklopedija* [The Great Russian Encyclopedia]. Vol. "Russia" (pp. 63–65). Moscow. *Izd-vo "Bol'shaja Rossijskaja jenciklopedija"* ["The Great Russian Encyclopedia" Publishing House]. 2004–2017. 27957 p.. [In Russian]
2. SP 124.13330.2012 [The Code of Practice on Design and Construction (The Code of Practice of Russia) No. 124.13330.2012]. *Teplovyje seti. Aktualiz. red. SNiP 41-02-2003* [Heating network. Updated edition of Building Norms & Regulations (National Codes and Standards of Russia) No. 41-02-2003] (intr. on January 1, 2013). [In Russian]
3. SP 61.13330.2012 [The Code of Practice on Design and Construction (The Code of Practice of Russia) No. 61.13330.2012]. *Teplovaja izoljacija oborudovanija i truboprovodov. Aktualiz. red. SNiP 41-03-2003* [Thermal insulation of equipment and pipelines. Updated edition of Building Norms & Regulations (National Codes and Standards of Russia) No. 41-03-2003] (with Amendment No. 1, intr. on January 1, 2013). [In Russian]
4. GOST 30732-2006 [State Industry Standard of Russia No. 30732-2006]. *Truby i fasonnnye izdelija stal'nye s teplovoj izoljaciej iz penopoliuretana v polijetilenovoj obolochke. Tehnicheskie uslovija* [Steel pipes and fittings with polyurethane foam thermal insulation in a polyethylene sheath. Technical conditions]. Moscow. *Standartinform* [Russian Scientific-Technical Information Centre for Standardization, Metrology and Conformity Assessment ("Standartinform" Publishers)]. 2007. 47 p. [In Russian]
5. E.A. Biryuzova, A.S. Gluhanov, N.S. Kobelev. *Primenenie sovremennyh truboprovodnyh sistem pri proektirovanii i rekonstrukcii teplovyh setej* [Application of modern pipeline systems in the design and reconstruction of heating networks]. *Izvestija JuZGU. Serija: Tehnika i tehnologii* [Bulletin of the Southwestern State University. Series: Engineering and technology]. 2012. No. 4. Pp. 63–68. [In Russian]
6. E.A. Biryuzova. *Koefficient teploprovodnosti kak osnovnaja harakteristika jeffektivnosti primeneniya materiala teplovoj izoljacji v teplosnabzhenii* [Thermal conductivity coefficient as the main characteristic of the effectiveness of the use of thermal insulation material in heat supply]. *Jenergo- i resursosberezhenie. Jenergoobespechenie. Netradicionnye i vozobnovljajemye istochniki jenerгии: Sb. mat. Vseross. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodyh uchenyh s mezhd. uchastiem* [Energy and resource saving. Power supply. Non-traditional and renewable energy sources: Coll. vol. of the All-Russian scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists with international participation]. December 18–21, 2012. Yekaterinburg. *UrFU* [Ural Federal University]. 2012. Pp. 37–40. [In Russian]
7. E.A. Biryuzova, A.S. Gluhanov. *Issledovanie osobennostej vybora sposoba prokladki teplovyh setej, vlijajushhih na ih jenergojeffektivnost'* [Investigation of the peculiarities of choosing a method for laying heating networks that affect their energy efficiency]. *Izvestija JuZGU. Serija: Tehnika i tehnologii* [Bulletin of the Southwestern State University. Series: Engineering and technology]. 2020. No. 4. Pp. 29–41. [In Russian]
8. E.A. Biryuzova, A.S. Glukhanov. Improving energy efficiency and reliability of heating networks through the use of multilayer thermal insulation structures. International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2020). September 2020. Sochi, Russia. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 962. Issue 3.
9. E.A. Biryuzova, A.S. Gluhanov. *Vlijanie sposoba prokladki truboprovodov na jenergojeffektivnost' teplovyh setej* [Influence of the method of laying pipelines on the energy efficiency of the heating network]. *Vestnik PNIPU. Serija: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Series: Building and architecture]. 2019. No. 4. Pp. 59–66. [In Russian]
10. E.A. Biryuzova, A.S. Gluhanov. *Jekspluatacionnye issledovanija teploizoljacionnyh konstrukcij teplovyh setej ob'ektov nazemnoj kosmicheskoy infrastruktury* [Operational research of heat-insulating structures of heating networks of objects of ground-based space infrastructure]. *Trudy VKA im. A.F. Mozhajskogo* [Proc. of the Mozhaisky Military Space Academy of Russia]. 2018. Issue 663. Pp. 17–22. [In Russian]
11. E.A. Biryuzova. *Povyshenie jenergojeffektivnosti teplovyh setej za schet primeneniya sovremennyh teploizoljacionnyh materialov* [Improving the energy efficiency of heating networks through the use of modern thermal insulation materials]. *Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo* ["Regional architecture and construction" Magazine]. 2013. No. 1. Pp. 62–66. [In Russian]