

УДК 624.1:625.7:656.1

Апталаев Марат Назимович

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»
Лысьвенский филиал
Россия, Лысьва¹
Инженер КЦ
E-Mail: Aptalaev_lfpstu@mail.ru

Численное моделирование влияния канального трубопровода на тепловой режим грунтового массива

Аннотация: Инженерные коммуникации, проложенные под проезжей частью городских дорог и улиц, оказывают значительное влияние на условия их эксплуатации, обусловленное формированием температурно-влажного пояса вокруг тепловых сетей. Однако в научной литературе практически отсутствует обоснований для рекомендаций по размещению инженерных коммуникаций в зонах пересечения с улично-дорожной сетью города. Для количественной оценки влияния канального либо бесканального теплопровода на ход сезонного промерзания, оттаивания и других процессов было выполнено данное исследование. В работе рассмотрены основные особенности канального метода прокладки инженерных коммуникаций, его достоинства и недостатки. Представлена математическая модель для количественной оценки влияния трубопровода на тепловой режим грунтового массива, позволяющая определять температуру произвольной точки грунтового массива в окрестности теплопровода. Рассмотрена зависимость температуры произвольной точки грунтового массива в зоне теплопровода от плотности и влажности грунта. Исследование показало, что трубопровод (как канальный, так и бесканальный) оказывает значительное влияние на тепловой режим грунтового массива. Полученные результаты являются основой для обоснования требований к размещению инженерных коммуникаций в зонах пересечения с городскими улицами и дорогами.

Ключевые слова: Инженерные коммуникации; метод канальной прокладки; математическая модель; теплопроводность грунта; тепловой режим грунтового массива.

Идентификационный номер статьи в журнале 01TVN114

¹ 618900, Пермский край, г. Лысьва, ул. Ленина, д.2

Marat Aptalaev

Perm National Research Polytechnic University, Lysva branch

Russia, Lysva

E-Mail: Aptalaev_lfpstu@mail.ru

Numerical modeling of channel duct and influence on soil thermal conditions

Abstract: Engineering communications laid under a carriageway of city roads and streets, make considerable impact on conditions of their maintenance, caused by formation of a temperature-wet belt round heat networks. However in the scientific literature practically is absent substantiations for recommendations about disposing of engineering communications in zones of crossing with a city road system. The research has been lead for a quantify assessment of the influence of channel or channel-free duct a on a course of seasonal freezing, thawing and other processes. In article describe the main features of the channel method of installation engineering services. A mathematical model for the quantify assessment of the impact of pipeline on the thermal regime of the soil mass is offered. Dependence of temperature of any point of a soil mass in a zone of a heating conduit from density and moistness of a soil is considered. Research showed that the pipe duct (as channel, and channel-free) makes considerable impact on a thermal mode of a soil mass. The received results are a basis for a substantiation of requirements to disposing of engineering communications in zones of crossing with city streets and roads.

Keywords: Utilities; channel construction method; the mathematical model; the thermal regime of the soil mass.

Identification number of article 01TVN114

Инженерные коммуникации, расположенные под проезжей частью улично-дорожной сети (УДС) города, оказывают значительное влияние на условия эксплуатации транспортных объектов. Можно выделить наиболее значимые факторы данных изменений:

- прорывы коммуникаций;
- утечки носителя из трубопровода;
- качество засыпки траншей после ремонтно-строительных работ.

Согласно статистике, за десять месяцев 2013 г. было допущено свыше 167 тысяч дорожно-транспортных происшествий (ДТП), из них 43 тысячи (25%) – по причине неудовлетворительного состояния улиц и дорог [10]. Для Пермского края данные показатели составили 4400 и 948 ДТП соответственно. Столь значительная доля ДТП (порядка одной четверти) свидетельствует о том, что состояние дорожного покрытия – один из важнейших факторов риска ДТП, в свою очередь, влияние теплопроводов, проложенных под дорожными одеждами улиц и дорог – одна из основных причин неудовлетворительного состояния УДС.

Таким образом, расположение трубопроводов непосредственно под дорожными одеждами УДС является крайне нежелательным. При этом полностью исключить пересечение подземных инженерных коммуникаций с УДС города практически невозможно даже на этапе нового строительства. Поэтому разработка рекомендаций по размещению трубопроводов в зонах пересечения с улицами и дорогами, основанных на анализе их взаимного влияния, является важной задачей.

Вокруг теплотрубопровода формируется температурно-влажный пояс, что приводит не только к определенным потерям тепла, связанными с перерасходом теплоносителя, но и к изменениям работы системы «земляное полотно - дорожная одежда». Помимо этого, теплопотери обратно воздействуют на саму инженерно-коммуникационную сеть.

По данным разных источников протяженность теплопроводов подземной и надземной прокладки в Российской Федерации составляет более 250 тыс. км. Не менее 85% общей протяженности составляют тепловые сети подземной прокладки. При этом для 80% трубопроводов тепловых сетей превышен срок безаварийной эксплуатации, а более 30% из них физически устарели и требуют капитального ремонта либо замены [11].

Основным способом строительства тепловых сетей является подземная канальная прокладка (до 84% от общего количества). Данный вид прокладки имеет ряд неоспоримых преимуществ:

1. Каналы предохраняют теплопроводы от воздействия грунтовых, атмосферных и паводковых вод;
2. Трубопроводы в них укладывают на подвижные и неподвижные опоры, при этом обеспечивается организованное тепловое удлинение;
3. *Канальный метод прокладки трубопроводов позволяет обеспечить быстрый доступ к трубам в случае проведения ремонтных работ и осмотров;*
4. В канальных прокладках давление грунта передается на строительные конструкции канала, позволяет трубопроводу и изоляционным конструкциям не испытывать нагрузки от давления грунта и других внешних напряжений;
5. каналы предотвращают выброс теплоносителя на поверхность земли при разрыве трубопровода.

Также имеется ряд недостатков:

1. Стоимость строительства в зависимости от диаметра выше на 10-50% по сравнению с бесканальным методом;
2. Сроки строительства выше в 2-3 раза по сравнению с бесканальным;
3. Сравнительно небольшой срок эксплуатации.

Бесканальная прокладка с применением предварительно изолированных труб применяется там, где технически невозможно или экономически нецелесообразно устройство дренажных систем для предотвращения затопления каналов грунтовыми водами и атмосферными осадками. На данный момент лишь 6% от общего объема тепловых сетей выполнено по данной технологии [1].

Бесканальные теплосети в сравнении с проложенными в каналах обладают рядом преимуществ [2]:

1. Снижение капитальных затрат при строительстве в 1,2–1,3 раза;
2. Сокращение сроков строительства в 2–3 раза;
3. Повышение долговечности конструкций до 25–30 лет и более, т.е. в 2–3 раза;
4. Уменьшение расходов на текущее обслуживание в 9–10 раз;
6. Снижение тепловых потерь с 20–40% до 2–3% в зависимости от местоположения.

Потери тепла в трубах с ППУ-изоляцией минимальны. Конструкция «труба в трубе» позволяет полностью исключить наружную коррозию трубопровода. В результате, значительно повышается надежность, долговечность, снижается доля ручного труда при строительстве и монтаже теплосетей, значительно снижаются эксплуатационные расходы после ввода трубопровода в эксплуатацию [2].

Для обеспечения своевременного устранения дефектов в период эксплуатации, при строительстве подземных трубопроводов, требуется предусмотреть наличие средств дистанционного контроля за состоянием труб.

В настоящее время, в российской научно-технической литературе уделяется самое пристальное внимание вопросам исследования тепловых режимов эксплуатации теплотрубопроводов [3].

Учитывая недостаточное обоснования по размещению теплотрасс при пересечении с дорожными объектами, была предпринята попытка по исследованию особенностей формирования водно-теплового режима земляного полотна в зоне их пересечения с УДС города.

Подземные теплопроводы представляют собой внутригрунтовый искусственный тепловой источник, расположенный обычно на глубине 2-2,5 м от поверхности дорожной одежды. Незначительная глубина заложения обоснована наличием защитного железобетонного канала, в случае канальной прокладки, либо футляра, в случае бесканальной прокладки [4]. Такое решение также предполагает удобство ремонта без разрытия дорожного полотна.

Присутствие источника излучения теплового потока непосредственно в грунтовой среде не рассматривалось, хотя его наличие вблизи активной зоны земляного полотна заметно изменяет температурно-влажностный баланс.

Для количественной оценки влияния канального теплопровода на ход сезонного промерзания и оттаивания, влагонакопления, разуплотнения и других процессов необходимо, прежде всего, реализовать изотермическое моделирование земляного полотна.

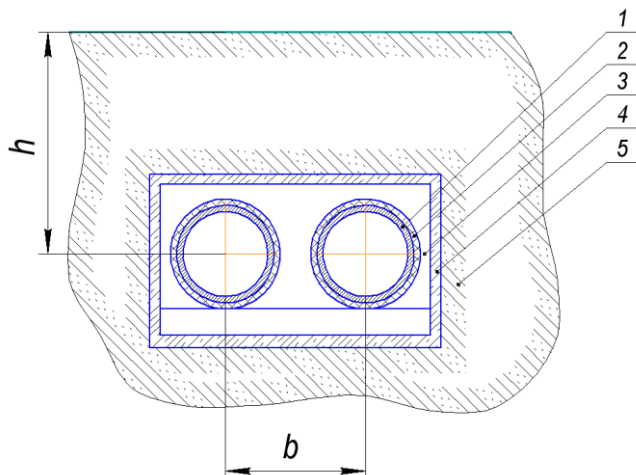


Рис. 1. Схема рассматриваемой системы «трубопровод – окружающая среда» (1 – металлическая стенка трубы, 2 – слой тепло- и гидроизоляции, 3 – воздушная прослойка, 4 – железобетонный короб, 5 – грунт, h – расстояние между поверхностью грунта и осью трубопровода, b – расстояние между осями трубопроводов)

Для рассматриваемой области (Рисунок 1) решается двумерная стационарная задача теплопереноса в системе «подземный канальный трубопровод – окружающая среда» [5]

Первым этапом при решении данной задачи становится получение и апробация математического выражения для расчёта температур от излучаемого через трубопровод теплового потока.

При постановке задачи на внешней границе рассматриваемой системы «слой теплоизоляции – окружающая среда» выставлялись граничные условия третьего рода, а на внутренней – граничные условия первого рода для задачи теплопроводности [6].

Требуемое выражение основывается на известном уравнении теплопроводности для полого цилиндра (трубы) произвольной длины [8]:

$$Q = \lambda \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot L}{h \cdot \frac{d_2}{d_1}} \right) * (t_1 - t_2) \quad (1)$$

где Q – количество тепла, проходящего за единицу времени, Вт;

λ – теплопроводность, Вт/(м · °С);

L – длина полого цилиндра, м;

d_1, d_2 – внутренний и внешний диаметры трубы соответственно, м;

$t_{1(2)}$ – температура между противоположными поверхностями цилиндра, °С.

Развёрнутое выражение для определения температуры в произвольной точке грунтового массива вокруг двухтрубного теплопровода, полученное преобразованием уравнения Ламе и Клапейрона, предложено А.П. Сафоновым [7]:

$$t = t_0 + \frac{q_1}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{zp}} * \ln \sqrt{\frac{x^2 + (y+h)^2}{x^2 + (y-h)^2}} + \frac{q_2}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_{zp}} * \ln \sqrt{\frac{(x-b)^2 + (y+h)^2}{(x-b)^2 + (y-h)^2}} \quad (2)$$

где t_0 – температура грунта на глубине оси теплопровода, °С;

q_1, q_2 – удельные тепловые потери первой и второй труб соответственно, Вт/м;

$\lambda_{гр}$ – теплопроводность грунта, Вт/(м · °С);

x и y – координаты расположения точки в грунте, м;

b – горизонтальное расстояние между осями труб, м;

h – глубина заложения оси теплопровода от поверхности земли, м

$$q_1 = \frac{(\tau_1 - t_0) * R_2 - (\tau_2 - t_0) * R_0}{R_1 * R_2 - R_0^2}, \text{ Вт/м} \quad (3)$$

$$q_2 = \frac{(\tau_2 - t_0) * R_2 - (\tau_1 - t_0) * R_0}{R_1 * R_2 - R_0^2}, \text{ Вт/м} \quad (4)$$

где τ_1, τ_2 – температура теплоносителя в первой и второй трубах соответственно, °С;

R_0 – условное дополнительное термическое сопротивление, учитывающее взаимное влияние первой и второй труб, м · °С/Вт;

R_1, R_2 – суммарное термическое сопротивление первой и второй труб соответственно, м · °С/Вт,

$$R_0 = \frac{1}{2 * \pi * \lambda_{gp}} * \ln \sqrt{1 + \left(\frac{2 * h}{b}\right)^2}, \text{ м} * C^0 / \text{Вт} \quad (5)$$

$$R_{1(2)} = R_{u1(2)} + R_{gp}, \text{ м} * C^0 / \text{Вт} \quad (6)$$

где R_{u1}, R_{u2} – термическое сопротивление изоляции трубы, м · °С/Вт;

$R_{гр}$ – термическое сопротивление грунта, м · °С/Вт,

$$R_{u1(2)} = \frac{1}{2 * \pi * \lambda_u} * \ln \frac{d_2}{d_1}, \text{ м} * C^0 / \text{Вт} \quad (7)$$

$$R_{gp} = \frac{1}{2 * \pi * \lambda_{gp}} * \ln \frac{4 * h}{d}, \text{ м} * C^0 / \text{Вт} \quad (8)$$

где λ_u – теплопроводность изоляции трубы, Вт/(м · °С).

Поскольку канальный трубопровод в зоне пересечения с дорогой помещается в железобетонный канал, то выражение (6) усложнится за счёт введения термического сопротивления канала - R_K и воздушной прослойки между железобетонной конструкцией и трубой - R_B

$$R_{1(2)} = R_{u1(2)} + R_{gp} + R_B + R_K, \text{ м} * C^0 / \text{Вт} \quad (9)$$

$$R_B = \frac{1}{2 * \pi * \lambda_B} * \ln \frac{d_{B2}}{d_{B1}}, \text{ м} * C^0 / \text{Вт} \quad (10)$$

$$R_K = \frac{1}{2 * \pi * \lambda_K} * \ln \frac{d_{K2}}{d_{K1}}, \text{ м} * C^0 / \text{Вт} \quad (11)$$

где $d_{B1(2)}, d_{K1(2)}$ – внутренние и наружные диаметры до границ воздушной прослойки и канала соответственно, м.

Для бесканального трубопровода в выражение (6) требуется ввести термическое сопротивление футляра.

$$R_{1(2)} = R_{u1(2)} + R_{gp} + R_B + R_{\phi}, \text{ м} * C^0 / \text{Вт} \quad (12)$$

$$R_{\phi} = \frac{1}{2 * \pi * \lambda_{\phi}} * \ln \frac{d_{\phi 2}}{d_{\phi 1}}, \text{ м} * \frac{C^0}{\text{Вт}} \quad (13)$$

Графическая демонстрация работоспособности предложенной модели представлена на рис. 1–2. Исследование проводилось для трубопровода с диаметром прохода 600 мм, с толщиной стенки 9 мм с тепловой изоляцией из минеральной ваты (толщиной 70 мм) [9]. Для примера расчёты выполнены для глубины заложения сети 1,0 м и температуры грунта на уровне оси трубы $t_0 = 1^\circ\text{C}$. Дорожная одежда в проведённых расчётах во внимание не принималась.

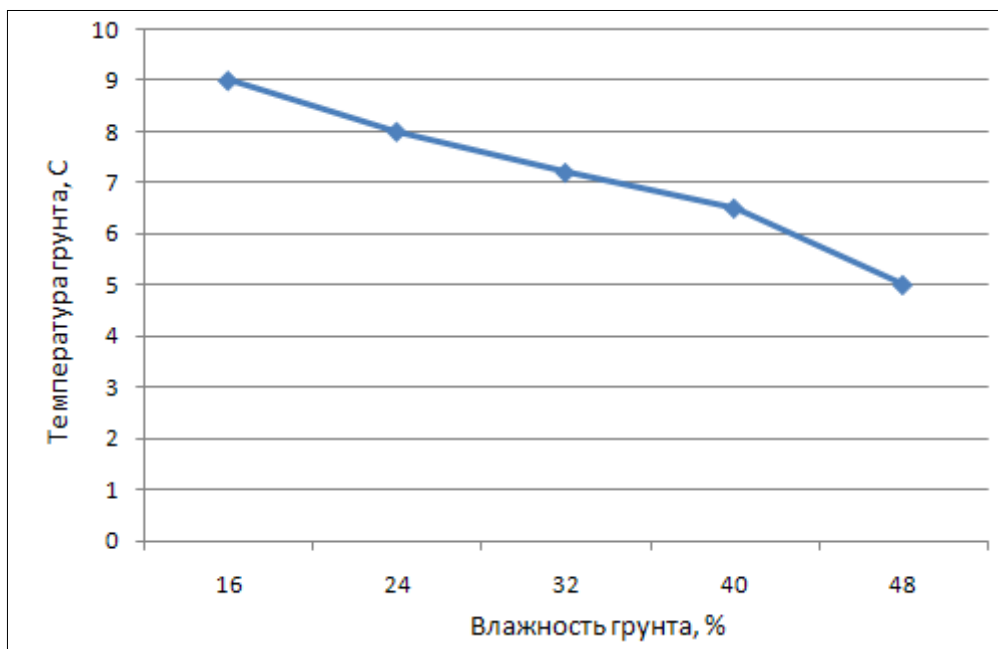


Рис. 2. Зависимость температуры на поверхности канала от влажности грунта, температура носителя 90/50 °С

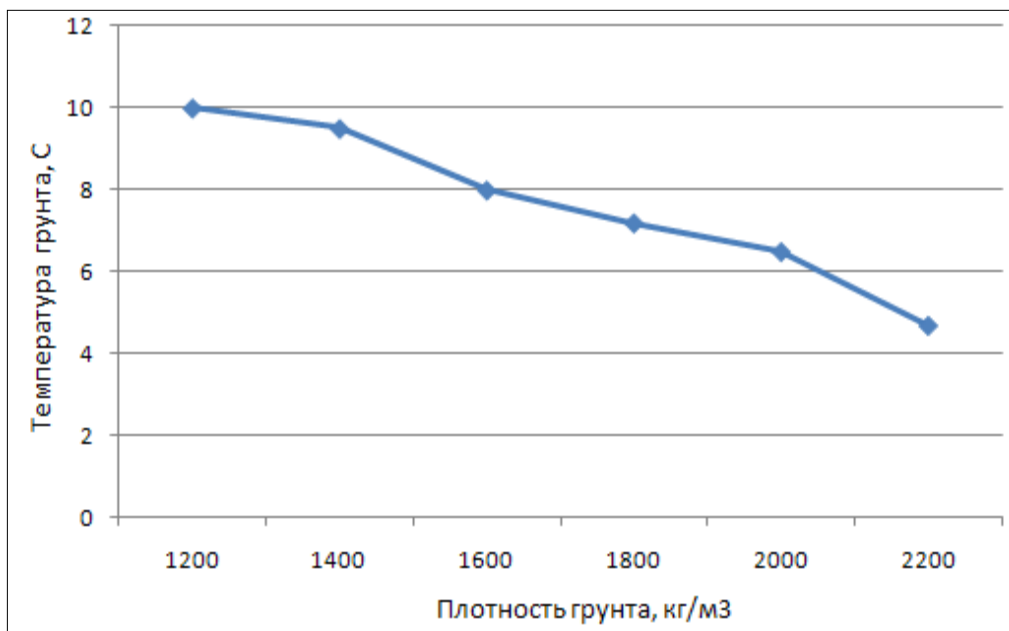


Рис. 3. Зависимость температуры на поверхности канала от плотности грунта, температура носителя 90/50 °С

Параметры влажности и плотности очень чётко коррелируют в следующем отношении: чем выше влажность и плотность грунта, тем выше его теплопроводность и ниже температура

в рассматриваемой точке массива (Рисунок 2, 3). Это можно объяснить объёмом заполненных воздухом пор: чем больше этот объём, тем более выражены теплоизоляционные свойства грунта и, как следствие, ниже температура в зоне соприкосновения грунта и канала трубопровода.

На основании анализа результатов исследования можно сделать следующие выводы:

1. в поясе расположения подземных теплосетей происходит удлинение талого периода для грунта земляного полотна, и, следовательно, - продлевается годовой период накопления остаточных деформаций в земляном полотне;
2. в зонах прокладки тепловых подземных коммуникаций увеличивается количество циклов замерзания и оттаивания грунта, что приводит к еще более интенсивному накоплению остаточных деформаций в земляном полотне;
3. в области влияния теплосетей происходит некоторое увеличение влажности грунта земляного полотна по сравнению с обычными участками, что также отражается на темпе накопления дефектов в системе «дорожная одежда – земляное полотно».

Для окончательного подтверждения результатов исследования, требуется проведение натурных экспериментов.

Таким образом, можно говорить о том, что перенос инженерных коммуникаций из-под УДС города является необходимым и обоснованным шагом для обеспечения долговечности и надежности состояния дорожных одежд транспортных объектов. При проектировании и строительстве новых элементов УДС следует избегать пересечения их с имеющимися подземными инженерными коммуникациями.

ЛИТЕРАТУРА

1. Манюк В.И., Майзель И.Л. Новое поколение тепловых сетей – высокоэффективные системы трубопроводов с пенополиуретановой изоляцией // Сантехника, № 5, 2004 г.
2. Майзель И.Л. Трубы с тепловой изоляцией из пенополиуретана – реальный путь усовершенствования системы теплоснабжения // Энергосбережение, № 2, 2002 г.
3. Слепченко В.С., Петраков Г.П. Повышение энергоэффективности теплоизоляции трубопроводов тепловых сетей северных и северо-восточных регионов России // Инженерно-строительный журнал, №4, 2011 г.
4. Яровой Ю.В., Корсунский В.Х., Бурдыга Ю.Ю. О системе качества трубопроводов в ППУ изоляции НП «Российское теплоснабжение» // Энергобезопасность и энергосбережение, №1, 2010 г.
5. Половников В.Ю., Хузеев В.А. Численный анализ влияния промерзания грунта в зоне прокладки на тепловые потери бесканальных теплопроводов // Magazine of Civil Engineering, №2, 2013 г.
6. Логинов В.С., Половников В.Ю. Численное моделирование тепловых режимов канальных теплотрубопроводов в условиях взаимодействия с влажным воздухом // Известия Томского политехнического университета, №4, 2008 г.
7. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Гос. изд-во Техничко-теоретической литературы, 1952. – 392 с.
8. Сафонов А.П. Сборник задач по теплофикации и тепловым сетям. Учебное пособие для ВУЗов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 232 с.
9. Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей. Курган: Интеграл, 2010. 357 с.
10. «Сведения о показателях состояния безопасности дорожного движения за 10 месяцев 2013 г.» [Электронный ресурс] // Госавтоинспекция МВД России: статистические отчеты [Офиц. сайт]. URL: <http://www.gibdd.ru/stat/>
11. «Новое поколение тепловых сетей – высокоэффективные системы трубопроводов с пенополиуретановой изоляцией» [Электронный ресурс] // Информационная система по теплоснабжению [Офиц. сайт]. URL: http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=1483

Рецензент: Балабанов Денис Сергеевич, заведующий кафедрой ТД, кандидат технических наук ЛФ ПНИПУ.

REFERENCES

1. Manjuk V.I., Majzel' I.L. Novoe pokolenie teplovyh setej – vysokojeffektivnye sistemy truboprovodov s penopoliuretanovoj izoljaciej // *Santehnika*, № 5, 2004 g.
2. Majzel' I.L. Truby s teplovoj izoljaciej iz penopoliuretana – real'nyj put' usovershenstvovaniya sistemy teplosnabzhenija // *Jenergobezopasnost'*, № 2, 2002 g.
3. Slepchenok V.S., Petrakov G.P. Povyshenie jenergojektivnosti teploizoljicii truboprovodov teplovyh setej severnyh i severo-vostochnyh regionov Rossii // *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal*, №4, 2011 g.
4. Jarovoj Ju.V., Korsunskij V.H., Burdyga Ju.Ju. O sisteme kachestva truboprovodov v PPU izoljicii NP «Rossijskoe teplosnabzhenie» // *Jenergobezopasnost' i jenergobezopasnost'*, №1, 2010 g.
5. Polovnikov V.Ju., Huzeev V.A. Chislennyj analiz vlijaniya promerzaniya grunta v zone prokladki na teplovyje poteri beskanal'nyh teploprovodov // *Magazine of Civil Engineering*, №2, 2013 g.
6. Loginov V.S., Polovnikov V.Ju. Chislennoe modelirovanie teplovyh rezhimov kanal'nyh teplotruboprovodov v uslovijah vzaimodejstvija s vlazhnym vozduhom // *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta*, №4, 2008 g.
7. Lykov A.V. *Teorija teploprovodnosti*. – M.: Gos. izd-vo Tehniko-teoreticheskoj literatury, 1952. – 392 s.
8. Safonov A.P. *Sbornik zadach po teplofikacii i teplovyim setjam. Uchebnoe posobie dlja VUZov*. – M.: Jenergoatomizdat, 1985. – 232 s.
9. *Spravochnik proektirovshhika. Proektirovanie teplovyh setej*. Kurgan: Integral, 2010. 357 s.
10. «Svedeniya o pokazateljah sostojaniya bezopasnosti dorozhnogo dvizhenija za 10 mesjacev 2013 g.» [Elektronnyj resurs] // Gosavtoinspekcija MVD Rossii: statisticheskie otchety [Ofic. sajt]. URL: <http://www.gibdd.ru/stat/>
11. «Novoe pokolenie teplovyh setej – vysokojeffektivnye sistemy truboprovodov s penopoliuretanovoj izoljaciej» [Elektronnyj resurs] // Informacionnaja sistema po teplosnabzheniju [Ofic. sajt]. URL: http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=1483