

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ДЛЯ ДВУХТРУБНЫХ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ ПРИ ПОДЗЕМНОЙ КАНАЛЬНОЙ И БЕСКАНАЛЬНОЙ ПРОКЛАДКЕ

Тарасевич Е.И.

*ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», Санкт-Петербург, e-mail: catia.smirnowa@yandex.ru*

В статье рассматривается процесс теплообмена трубопроводов тепловых сетей, проложенных в грунте с различными способами подземной прокладки. Задачи о распространении теплоты в системах теплоснабжения играют значительную роль. Нормативные показатели тепловых потерь тепловых сетей не позволяют учитывать множество факторов, влияющих на теплообмен в данных инженерных системах. В работе представлена математическая модель температурного поля вокруг теплопроводов. Предложенная модель позволяет определить состояние тепловой изоляции. Такие тепловые расчеты направлены на то, чтобы определить фактические тепловые потери. В статье прослеживается изменение поля температур вокруг трубопроводов, исходя из условий эксплуатации тепловых сетей. В работе изложено применение метода численного моделирования теплообмена для тепловых сетей. На рисунках приводятся распределение полей температур для бесканальной и канальной подземных прокладок двухтрубной тепловой сети с тепловой изоляцией из пенополиуретана с системой оперативного дистанционного контроля влажности, а также присутствуют тепловые потоки для этих коммуникаций.

**Ключевые слова:** тепловой поток, тепловой расчет, тепловые сети, теплопровод, теплопроводность, термическое сопротивление

## NUMERICAL SIMULATION OF HEAT TRANSFER FOR TWO-PIPE HEATING NETWORKS LAID UNDERGROUND IN THE CHANNEL OR LAID UNDERGROUND WITHOUT CHANNEL

Tarasevich E.I.

*Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,  
Saint-Petersburg, e-mail: catia.smirnowa@yandex.ru*

This article addresses the process of heat exchange of heating pipelines laid in the ground at various ways of laying. The problem of spread of heat in heat supply systems play a significant role. Normative data of thermal losses thermal networks do not allow to consider many factors affecting the heat transfer in these engineering systems. The study shows a mathematical model of the temperature field around the heating pipelines. This model allows to determine the condition of thermal insulation. Such thermal calculations are intended to determine the actual heat loss. The article traces the change of temperature field around the pipeline, based on the conditions of operation of heating networks. This study presents the application of the method of numerical simulation of heat transfer with particular focus on the use of heating networks. Here in the figures there are the distribution of temperature field for two-pipe heating networks laid underground in the channel or laid underground without channel with foamed polyurethane thermal insulation with the operational system for the remote control of moisture and there are heat flows for these engineering systems.

**Keywords:** heat flow, thermal calculation, thermal networks, pipeline of heat supply system, thermal conductivity, thermal resistance

На сегодняшний день энергосбережение является одним из основных приоритетов энергетической стратегии Российской Федерации согласно № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [11] и № 190-ФЗ «О теплоснабжении» [12]. Анализ результатов современных исследований фактических тепловых потерь трубопроводов тепловых сетей [14] выявил существенные превышения по сравнению с нормативными данными [8]. Теплопередача в случае теплопровода, находящегося в полуограниченном массиве грунта, является очень сложным процессом. На поток теплоты от теплопровода накладывается естественный тепловой поток со

стороны грунта, частично «замещающий» тепловую потерю теплопровода [13]. Когда две трубы тепловой сети проложены бесканально в грунте, в результате возникновения тепловых потерь вокруг теплопроводов, образуются и температурные поля, воздействующие друг на друга и способствующие сокращению тепловых потерь каждой трубы в отдельности. Соседний теплопровод может равноценно увеличить сопротивление для рассматриваемого теплопровода [3]. Следовательно, очень важно найти методы, позволяющие определить действительное значение тепловых потерь, целью которых является корректировка нормативных величин тепловых потерь, предложенных в нормативных документах, например таких, как СНиП 41-03-2003 «Тепловая изоляция оборудования

и трубопроводов» [9] и СНиП 41-03-2003 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Актуализированная редакция» [10].

Тепловые потери – это показатели энергоэффективной эксплуатации системы теплоснабжения, так как они играют значительную роль в тарифах на тепловую энергию. Следовательно, определение фактического значения величины теплопотерь является одной из главных практических задач в системе энергоресурсосбережения. Тепловые потери трубопроводов тепловых сетей зависят от различных факторов, таких как диаметр трубопроводов, протяженность, теплоизоляционные материалы, состояния трубопроводов.

Исходя из вышперечисленного, вопрос нахождения минимальных тепловых потерь остается открытым. Для анализа тепловых потерь трубопроводов тепловой сети предлагается использовать численное моделирование. Современные вычислительные программы позволяют учесть различные факторы, влияющие на величину тепловых потерь. Для повышения эффективности использования тепловой энергии необходимо совершенствовать методы тепловых расчетов систем теплоснабжения.

В данной работе используются следующие методы исследования:

- разработка математической модели теплообмена тепловой сети и окружающей среды;
- применение численных методов решения основных задач теплового расчета;
- изучение тепловых полей и потоков для различных сечений трубопроводов тепловых сетей.

Расчёт температур  $T, K$ , в трубопроводах выполняется с помощью закона Фурье для нестационарного температурного поля [7]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(\lambda \nabla T) = Q_{heat}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность,  $кг/м^3$ ;  $t$  – время,  $с$ ;  $C_p = C_p(T)$  – изобарная теплоёмкость воздуха,  $Дж/(кг \cdot K)$ ;  $\lambda = \lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности,  $Вт/(м \cdot K)$ ;  $Q_{heat}$  – источник или сток теплоты,  $Вт/м^3$ .

Для задания начальных условий будем считать, что процесс теплопередачи исследуется с момента времени  $t = 0$  с. Постановка задачи принята стационарная. В этом случае для её решения строится нестационарный процесс, решение которого с течением времени (фиктивного) оказывается независимым от него и приводится к решению исходной стационарной задачи.

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho \vec{V})}{\partial t} + \rho(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = \nabla[\eta(\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T) - p] - \left(\frac{2}{3}\eta - k_{dv}\right)(\nabla \cdot \vec{V}) + \vec{g}(\rho - \rho_\phi), \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{V}) = 0, \end{cases} \quad (5)$$

При расчётах начальным значением температуры  $T(t = 0)$  принимаем:

– температура воды  $T(t = 0) = 338,15$  К для прямого трубопровода и  $T(t = 0) = 323,15$  К для обратного трубопровода;

– температура грунта  $T(t = 0) = 279,15$  К.

Влияние источника (горячей воды в трубах) учитывается с помощью граничного условия:

$$-\vec{n} \cdot (-\lambda \nabla T) = \alpha(T_{inf} - T) + \varepsilon \sigma (T_{inf}^4 - T^4), \quad (2)$$

где  $\vec{n}$  – нормальный единичный вектор к граничной поверхности, направленный наружу от граничной области;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $Вт/(м \cdot K)$ ;  $T$  – температура,  $К$ ;  $T_{inf}$  – температура окружающей среды,  $К$ ;  $\varepsilon$  – степень черноты поверхности;  $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8}$   $Дж \cdot с^{-1} \cdot м^{-2} \cdot К^{-4}$  – константа Стефана – Больцмана;  $\alpha$  – коэффициент конвективного теплообмена,  $Вт/(м^2 \cdot K)$ : от воды к внутренним стенкам трубопровода принимается  $\alpha = 2500$   $Вт/(м^2 \cdot K)$  [5].

Средняя температура за зимний период на нижней границе расчётной области – грунта (супеси) на глубине 3,5 м на территории Санкт-Петербурга принята  $6^\circ C$  [6].

На боковых границах задаётся граничное условие «симметрия»:

$$-\vec{n} \cdot (-\lambda \nabla T) = 0, \quad (3)$$

где  $\vec{n}$  – нормальный единичный вектор к граничной поверхности, направленный наружу от граничной области;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $Вт/(м \cdot K)$ ;  $T$  – температура,  $К$ .

Численное решение уравнения (1) для трубопроводов с тепловой изоляцией из пенополиуретана с системой оперативного дистанционного контроля влажности (ППУ с ОДК) для бесканальной подземной прокладки выполнено методом конечных элементов в программе «Comsol Multiphysics» 3.5a. Результаты решения приведены на рис. 1 и 2.

На остальных границах задаётся граничное условие «конвективный поток»:

$$-\vec{n} \cdot (-\lambda \nabla T) = 0, \quad (4)$$

где  $\vec{n}$  – нормальный единичный вектор к граничной поверхности, направленный наружу от граничной области;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $Вт/(м \cdot K)$ ;  $T$  – температура,  $К$ .

В воздушных прослойках возникает конвекция, характерная для замкнутых областей. Для расчёта поля скоростей  $\vec{V}$  используется система уравнений Навье – Стокса для сжимаемой вязкой жидкости и газа [4]:

где  $\eta = \eta(T)$  – динамическая вязкость, Па·с.;  $k_{dv}$  – объемная («вторая») вязкость, Па·с.;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – время, с;  $\rho_{\phi}$  – фоновая плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;  $p$  – динамическое давление воздуха, Па;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения.

Плотность воздуха рассчитывается с помощью уравнения состояния идеального газа:

$$\rho = \frac{p + p_{\text{атм}}}{RT}, \quad (6)$$

где  $p$  – динамическое давление воздуха, Па;  $p_{\text{атм}} = 101325$  Па – нормальное атмосферное

давление;  $R = 287$  Дж/(кг×К) – газовая постоянная воздуха;  $T$  – температура, К.

Начальные условия для скорости и давления следующие:

$$\begin{cases} \vec{V}(t=0) = 0, \\ p(t=0) = 0. \end{cases} \quad (7)$$

На непроницаемых поверхностях для скорости задается граничное условие «прилипания»:

$$\vec{V} = 0. \quad (8)$$

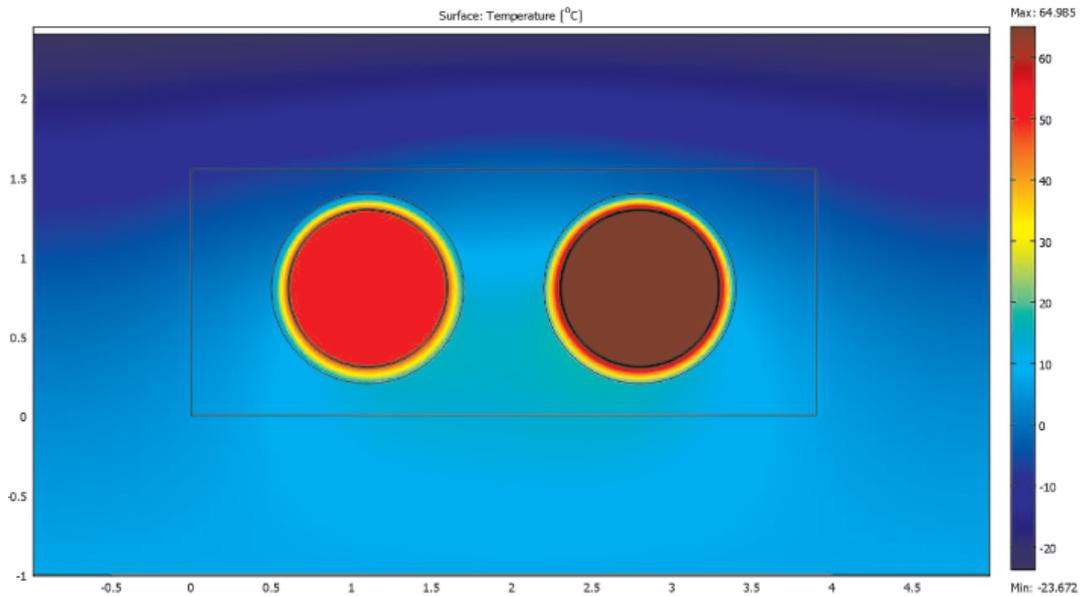


Рис. 1. Поле температур, °С, теплопроводов двухтрубной тепловой сети условным диаметром 1000 мм с ППУ с ОДК для бесканальной подземной прокладки

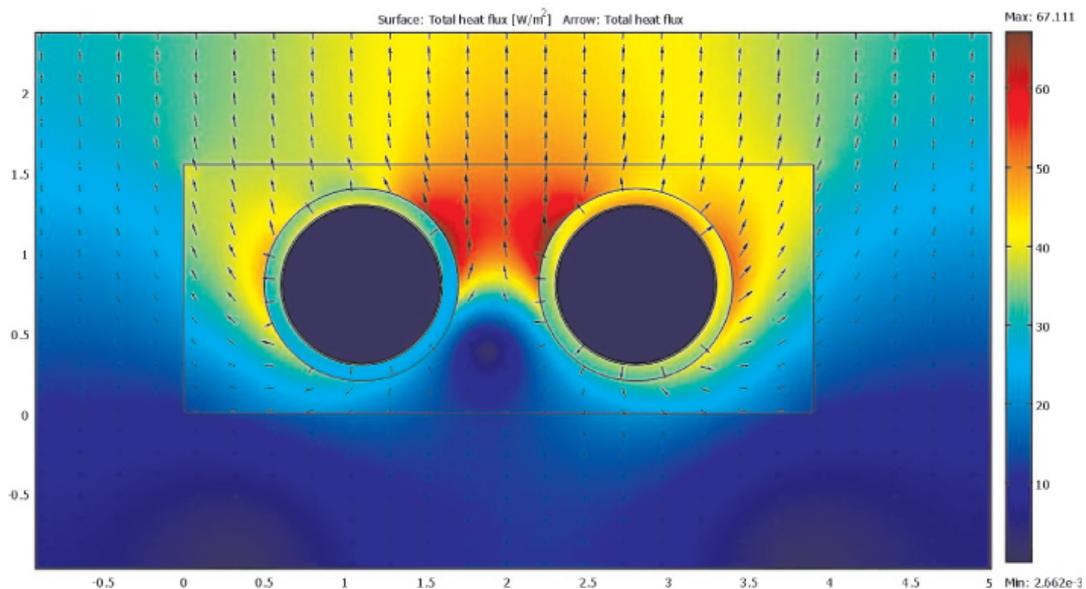


Рис. 2. Тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>, теплопроводов двухтрубной тепловой сети условным диаметром 1000 мм с ППУ с ОДК для бесканальной подземной прокладки

Для расчёта конвективного и радиационного теплообмена в замкнутых воздушных прослойках со сложной геометрией (с переменными толщинами и пространственными ориентациями) некорректно применять термическое сопротивление, используя соответствующие методики из СНиП 41-03-2003 «Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов» [9].

При расчетах радиационного теплообмена воздуха в замкнутых воздушных прослойках используется метод сальдо [2]:

$$-\vec{n} \cdot (-\lambda \nabla T) = \varepsilon \left( \frac{J_0 - \varepsilon \sigma T^4}{1 - \varepsilon} - \sigma (T^4 - T_{\text{inf}}^4) \right), \quad (9)$$

где  $\vec{n}$  – нормальный единичный вектор к граничной поверхности, направленный

наружу от граничной области;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $T$  – температура, К;  $\varepsilon$  – степень черноты поверхности;  $J_0$  – удельное теплоизлучение поверхностью тела, Вт/м<sup>2</sup>;  $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8}$  Дж·с<sup>-1</sup>·м<sup>-2</sup>·К<sup>-4</sup> – константа Стефана – Больцмана;  $T_{\text{inf}}$  – температура окружающей среды.

При расчётах конвективного теплообмена фоновая плотность воздуха  $\rho_f$  определяется по уравнению состояния идеального газа, причём температура принимается средняя по слою прослойки.

На рис. 3 и 4 приведены результаты расчёта теплопроводов двухтрубной тепловой сети условным диаметром 125 мм с ППУ с ОДК для подземной прокладки в непроходных каналах типа КН-II.

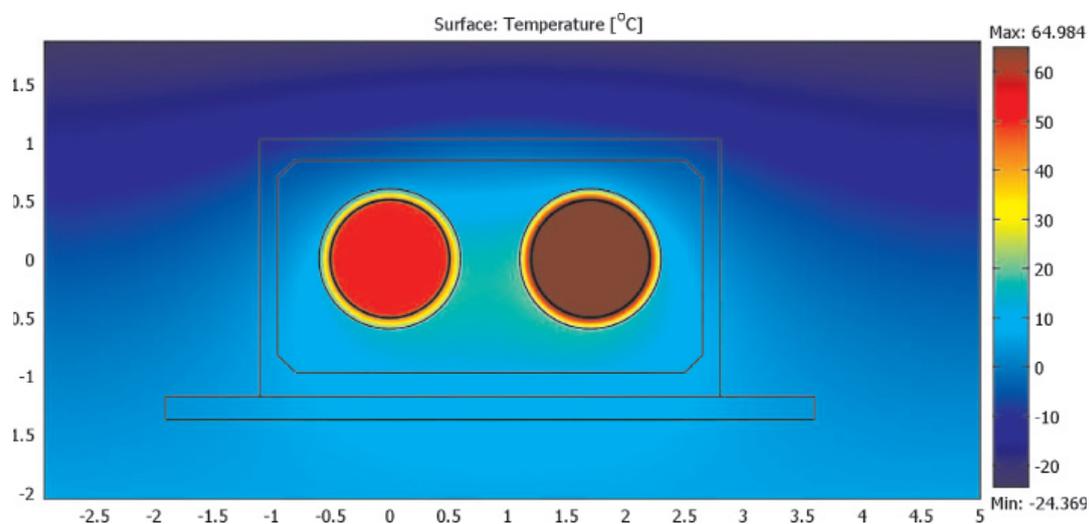


Рис. 3. Поле температур, °С, теплопроводов двухтрубной тепловой сети условным диаметром 125 мм с ППУ с ОДК для подземной прокладки в непроходных каналах типа КН-II

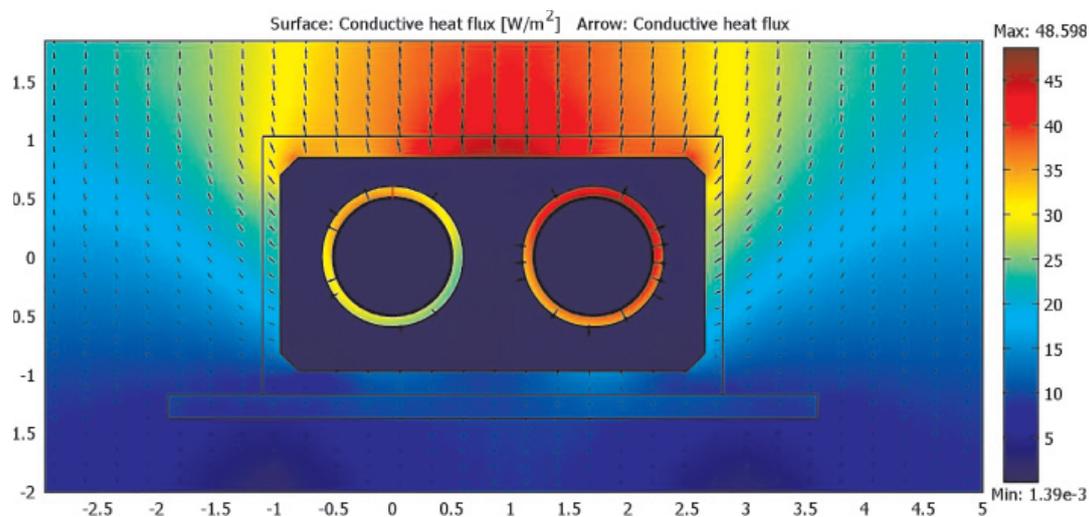


Рис. 4. Тепловой поток за счёт теплопроводности, Вт/м<sup>2</sup>, теплопроводов двухтрубной тепловой сети условным диаметром 125 мм с ППУ с ОДК для подземной прокладки в непроходных каналах типа КН-II

Численное моделирование тепловых процессов трубопроводов тепловых сетей является актуальной задачей при разработке энергосберегающих мероприятий для системы теплоснабжения. Использование математического моделирования позволяет достаточно эффективно решать сложные научно-технические задачи, не применяя значительных временных и материальных ресурсов. Разработав математическую модель процессов, связанных с двухтрубными теплопроводами, включающую дифференциальные уравнения, а также начальные и граничные условия, можно решить задачу и получить распределение температур и тепловых потоков и сделать их визуализацию. В статье рассматривалась широко распространенная подземная прокладка тепловых сетей, т.к. ГОСТ 30732-2006 [1] и EN 253 [15] рекомендуют к широкому внедрению подземную прокладку теплопроводов, в частности бесканальную с тепловой изоляцией из пенополиуретана с системой оперативного дистанционного контроля влажности [1, 15]. Для данного типа прокладки в дальнейшем возможно будет откорректировать значение тепловых потерь. Изучив рисунки, представленные в статье, можно обосновать величины теплопотерь, а именно, чем больше диаметр трубопровода, тем ниже должен быть тепловой поток через стенку теплопровода. Задачи теплопроводности, возникающие в системах теплоснабжения, нечасто имеют решение с помощью аналитического метода. Следствием этого может быть трудность создания математических моделей, сильно зависящих от теплофизических свойств и коэффициентов в граничных условиях, а также сложная геометрия объектов, таких как цилиндры. Таким образом, численные методы, использующие компьютерную реализацию, являются универсальным способом решения задач в системах двухтрубных тепловых сетей.

#### Список литературы

1. ГОСТ 30732-2006. Трубы и фасонные изделия стальные с тепловой изоляцией из пенополиуретана с защитной оболочкой. – М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2007 – 48 с.
2. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. – М.: Мир, 1975. – 934 с.
3. Козин В.Е., Левина Т.А., Марков А.П., Пронина И.Б., Слемзин В.А. Теплоснабжение: Учебное пособие для студентов вузов. – М.: Высш. школа, 1980. – 408 с.
4. Красников Г.Е., Нагорнов О.В., Старостин Н.В. Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics: учебное пособие. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 184 с.
5. Налобин Н.В. Оптимизация толщины ППУ-изоляции трубопроводов в системах теплоснабжения объектов на Севере Западной Сибири: дис. канд. техн. наук. – Тюмень, 2007. – 138 с.
6. Николаев А.А. Проектирование тепловых сетей (Справочник проектировщика) / А.А. Николаев [и др.]; под ред. А.А. Николаева. – М.: НАУКА, 1965. – 361 с.
7. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Эдиториал УРСС, 2003. – 784 с.
8. Семенов В.Г. Определение фактических тепловых потерь через теплоизоляцию в сетях централизованного теплоснабжения // Новости теплоснабжения. – 2003. – № 4. – URL: [http://www.rosteplo.ru/Tech\\_stat/stat\\_shablono.php?id=396](http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablono.php?id=396).
9. СНиП 41-03-2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. – М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004. – 29 с.
10. СНиП 41-03-2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Актуализированная редакция. – URL: <http://gostrf.com/normadata/1/4293796/4293796604.htm>.
11. Федеральный закон РФ от 23.11.2009 № 261-ФЗ (ред. от 29.12.2014) Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации.
12. Федеральный закон РФ от 27.07.2010 № 190-ФЗ (ред. от 29.12.2014) О теплоснабжении (с изм. и доп., вступ. в силу с 03.03.2015).
13. Шкаровский А. Теплоснабжение. Основы расчетов и проектирования. – Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2012. – 395 с.
14. Шойхет Б.М. Обследование технического состояния и реконструкция тепловой изоляции эксплуатируемых магистральных теплопроводов // Энергосбережение. – 2002. – № 3. – С. 60–62. – URL: [http://www.abok.ru/avok\\_press/content.php?1+3+2002](http://www.abok.ru/avok_press/content.php?1+3+2002).
15. European Standard EN 253 District heating pipes – Preinsulated bonded pipe systems for directly buried hot water networks – Pipe assembly of steel service pipe, polyurethane thermal insulation and outer casing of polyethylene. – URL: [http://www.pputruba.ru/associacia/en253\\_evrostandart.pdf](http://www.pputruba.ru/associacia/en253_evrostandart.pdf).

#### References

1. GOST 30732-2006. Truby i fasonnye izdeliya stalnye s teplovoy izolyatsiyey iz pe-nopoliuretana s zashchitnoy obolochkoy. M.: STANDARTINFORM, 2007 48 p.
2. Zigel R., Khaueil Dzh. Teploobmen izlucheniem. M.: Mir, 1975. 934 p.
3. Kozin V.E., Levina T.A., Markov A.P., Pronina I.B., Slemzin V.A. Teplosnabzhenie: Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov. M.: Vyssh. shkola, 1980. 408 p.
4. Krasnikov G.E., Nagornov O.V., Starostin N.V. Modelirovanie fizicheskikh protsessov s ispolzovaniem paketa Comsol Multiphysics: Uchebnoe posobie. M.: NIYaU MIFI, 2012. 184 p.
5. Nalobin N.V. Optimizatsiya tolshchiny PPU-izolyatsii truboprovodov v sistemakh teplo-snabzheniya obktoov na Severe Zapadnoy Sibiri: dis. kand. tekhn. nauk. Tyumen, 2007. 138 p.
6. Nikolaev A.A. Proektirovanie teplovykh setey (Spravochnik proektirovshchika) / A.A. Nikolaev [i dr.]; pod red. A.A. Nikolaeva. M.: NAUKA, 1965. 361 p.
7. Samarskiy A.A., Vabishchevich P.N. Vychislitel'naya teploperedacha. M.: Editorial URSS, 2003. 784 p.
8. Semenov V.G. Opredelenie fakticheskikh teplovykh poter cherez teploizolyatsiyu v setyakh tsentralizovannogo teplosnabzheniya // Novosti teplosnabzheniya. – 2003. – № 4. – URL: [http://www.rosteplo.ru/Tech\\_stat/stat\\_shablono.php?id=396](http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablono.php?id=396).

nogo teplosnabzheniya // Novosti teplosnabzheniya. 2003 no. 4 URL:[http://www.rosteplo.ru/Tech\\_stat/stat\\_shablon.php?id=396](http://www.rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=396).

9. SNiP 41-03-2003. Teplovaya izolyatsiya oborudovaniya i truboprovodov. M.: Gosstroy Ros-sii, FGUP TsPP, 2004. 29 p.

10. SNiP 41-03-2003. Teplovaya izolyatsiya oborudovaniya i truboprovodov. Aktualizirovannaya redaktsiya. URL: <http://gostrf.com/normadata/1/4293796/4293796604.htm>.

11. Federalnyy zakon RF ot 23.11.2009 no. 261-FZ (red. ot 29.12.2014) Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoy effektivnosti i o vnesenii izmeneniy v otdelnye zakonodatelnye akty Rossiyskoy Federatsii.

12. Federalnyy zakon RF ot 27.07.2010 no. 190-FZ (red. ot 29.12.2014) O teplosnabzhenii (s izm. i dop., vstup. v silu s 03.03.2015).

13. Shkarovskiy A. Teplosnabzhenie. Osnovy raschetov i proektirovaniya / A. Shkarovskiy. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2012. 395 p.

14. Shoykhet B.M. Obsledovanie tekhnicheskogo sostoyaniya i rekonstruktsiya teplovoy izolyatsii ekspluatiruemykh magistralnykh teploprovodov // Energosberezhenie. 2002. no. 3 pp. 60–62. URL:[http://www.abok.ru/avok\\_press/content.php?1+3+2002](http://www.abok.ru/avok_press/content.php?1+3+2002).

15. European Standard EN 253 District heating pipes Pre-insulated bonded pipe systems for directly buried hot water networks Pipe assembly of steel service pipe, polyurethane thermal insulation and outer casing of polyethylene. URL:[http://www.pputruba.ru/associacia/en253\\_evrostandart.pdf](http://www.pputruba.ru/associacia/en253_evrostandart.pdf).

**Рецензенты:**

Уляшева В.М., д.т.н., доцент, профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет», г. Санкт-Петербург;

Гримитлин А.М., д.т.н., профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский архитектурно-строительный университет», директор некоммерческого партнёрства энергоаудиторов «Инженерные системы аудит» (СПб), президент АВОК Северо-Запад, генеральный директор НПП «ЭКОЮРУС-ВЕНТО», г. Санкт-Петербург.