УДК 621.643.001:536.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ БЕСКАНАЛЬНЫХ ТЕПЛОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ РЕАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Половников В.Ю.

Национальный исследовательсктй Томский политехнический университет, Томск, Россия

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-08-00201-а и грантов Президента РФ № МК-1284.2011.8, № МК-1652.2013.8.

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты математического моделирования тепловых режимов бесканальных теплопроводов, а также численного анализа тепловых потерь рассматриваемых объектов в условиях промерзания грунта и наличия снежного покрова в зоне прокладки. Установлены закономерности теплопереноса в рассматриваемой системе и факторы, влияющие на интенсификацию потерь тепловой энергии. Выявлено, что нормативная методика расчета тепловых потерь бесканальных теплопроводов дает завышенные величины потерь тепловой энергии.

ВВЕДЕНИЕ

Тепловые режимы теплопроводов равно как и масштабы тепловых потерь в тепловых сетях оказывают существенное влияние на экономичность и эффективность работы систем теплоснабжения. При этом основное влияние на уровень тепловых потерь оказывают состояние тепловой изоляции [1] и условия эксплуатации теплопроводов [2, 3]. Следует отметить, что в настоящее время уровень тепловых потерь в сетях теплоснабжения РФ чрезвычайно велик и составляет 20-30 % [4] в то время как в мире он не превышает 6-8 % [5].

Действующие нормы и правила проектирования тепловой изоляции [6, 7], а, следовательно, и методы анализа тепловых режимов теплопроводов основаны на упрощенных аналитических соотношениях и не учитывают множества реальных факторов и процессов, приводящих к интенсификации процессов теплопереноса в элементах конструкций и зонах размещения теплопроводов. В связи с этим особую актуальность приобретает разработка новых подходов к проектированию и анализу эксплуатационных режимов систем транспортировки тепловой энергии, учитывающих полный комплекс физических процессов, протекающих в рассматриваемых системах.

Целью данной работы является демонстрация возможностей современных подходов к исследованию тепловых режимов и тепловых потерь систем транспортировки тепла на примере работы типичной бесканальной тепловой сети в условиях реальной эксплуатации.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматривается типичный теплопровод бесканальной прокладки – трубопроводы изолированные пенополиуретаном и защитным покровным гидроизоляционным слоем из полиэтилена [8] (рисунок 1: 1 –металлическая стенка трубы; 2 – теплоизоляционный слой; 3 – слой гидроизоляции; 4 – грунт талый; 5 – граница раздела между талыми и мерзлыми зонами; 6 – грунт мерзлый; 7 – снег уплотненный; 8 – снег талый; п, о – подающий и обратный теплопроводы; H – расстояние от поверхности грунта до верхних точек слоев гидроизоляции; L – расстояние между осями теплопроводов; h – толщина снежного покрова). Предполагается, что теплопровод эксплуатируется в условиях промерзания грунта и наличия снежного покрова в зоне над прокладкой. Для рассматриваемой области (рисунок 1) решается двумерная стационарная задача теплопроводности в системе «беска-

нальный теплопровод – окружающая среда». Решение нестационарной задачи теплопереноса для рассматриваемой системы (рисунок 1) не является целесообразным, поскольку нестационарные режимы работы теплопроводов наблюдаются только при вводе тепловых сетей в эксплуатацию после плановых или внеплановых остановок и не являются характерными режимами их работы [9].

В настоящее время имеется ряд работ [10–14], посвященных исследованию тепловых режимов и тепловых потерь бесканальных теплопроводов. В [10–14] приведены результаты анализа влияние различных эксплуатационных факторов на тепловые потери бесканальных теплотрасс, а также описаны проблемы, связанные с проектированием и эксплуатацией предизолированных бесканальных трубопроводов тепловых сетей. При этом в [10–13] не учитывается возможное промерзание грунта в зоне прокладки и изменение его теплофизических характеристик, хотя из [15] известно, что в большинстве регионов России наблюдается сезонное промерзание грунтов с существенными глубинами нулевой изотермы. Только в [14] приведены результаты численного исследования тепловых режимов и тепловых потерь бесканальных теплопроводов с учетом промерзания грунта в зоне прокладки. Данная работа является продолжением исследований [14], в которой учитывается наличие дополнительного термического сопротивления в виде слоя снега над прокладкой (рисунок 1).

Математическая модель для рассматриваемой задачи аналогична моделям [9, 14], а решение поставленной задачи получено с использованием метода конечных элементов и подробно описано в [14].

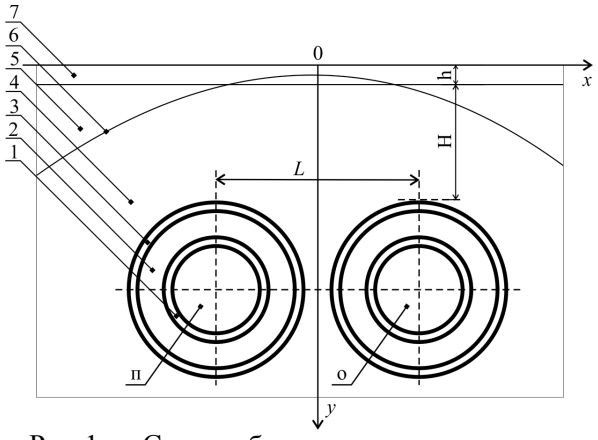

Рис.1 Схема области решения.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

При проведении численного моделирования использовалась расчетная область размерами 6 м в глубину и по 5 м в стороны от оси симметрии. Размеры расчетной области выбирались на основании серии предварительных численных экспериментов таким образом, чтобы относительное изменение температур на границах области решения не превышало 0,5 %.

Исследования проводились для трубопроводов с диаметрами условного прохода трубопроводов 600 мм, изготовленных из стали 10 (толщина стенки 8 мм), тепловая изоляция – пенополиуретан (толщина 40 мм) [8], покровный слой – полиэтилен (2 мм) [8]. Расстояния от поверхности грунта до верхних точек слоев гидроизоляции принималось равным H = 2 м, а между осями трубопроводов составляло L = 1,3 м (рисунок 1). Предполагалось, что тепловая сеть работает по температурному графику 95/70 °С [6]. Толщина снежного покрова принималась равной количеству осадков выпавших за холодный период года для города Томск [15] h = 185 мм (рисунок 1). Температура окружающей среды принималась равной средней температуре воздуха за отопительный период в городе Томск [15] – 264,2 К. Средний коэффициент теплоотдачи на поверхности раздела «уплотненный снег – окружающая среда» варьировался в пределах от 5 до 30 Вт/(м^2·К). Численные значения теплофизических характеристик грунтов, снега, стенки трубы, тепловой и гидроизоляции, использовавшиеся при проведении численных исследований, приведены в [14, 16].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Обоснованность и достоверность результатов исследований следует из проведенных проверок используемых методов на сходимость и устойчивость решений на множестве сеток, выполнения условий баланса энергии на границах области расчета, а также подтверждается хорошим качественным согласованием полученных результатов с известными данны-

ми других авторов [12, 13]. Относительная погрешность расчетов во всех вариантах численного анализа не превышала 0,2 %, что является приемлемым при оценке тепловых потерь бесканальных теплотрасс.

Результаты численного моделирования тепловых потерь бесканальных теплопроводов свидетельствуют об ожидаемом росте тепловых потерь при прокладке теплопроводов в песчаных грунтах, имеющих большие коэффициенты теплопроводности [14, 16]. Также наблюдается закономерное возрастание потерь тепловой энергии с ростом интенсивности теплоотдачи на внешнем контуре рассматриваемой системы (рисунок 1).

Анализ изменения величин тепловых потерь в зависимости от значений коэффициентов теплоотдачи на границе раздела «уплотненный снег – окружающая среда» позволяет сделать вывод о том, что увеличение теплоотдачи в 6 раз приводит к росту тепловых потерь до 3,5 %.

Учет наличия снежного покрова над прокладкой приводит к соответствующему снижению тепловых потерь вследствие увеличения эффективного термического сопротивления слоя над прокладкой. Сопоставление значений тепловых потерь бесканальных теплопроводов с учетом промерзания грунта и наличия снежного покрова над прокладкой и без учета наличия слоя снега позволяет сделать вывод о том, что при наличии снежного покрова и прокладке теплопроводов в песчаных грунтах потери тепла снижаются на 14,03–15,86 %, а в глинистых на 8,91–9,40 % в зависимости от значений коэффициентов теплоотдачи на внешнем контуре взаимодействия.

Следует еще раз отметить, что в нормативной методике [6, 7] отсутствует возможность учета влияния таких факторов как изменение условий теплообмена на границе «снег – окружающая среда» и изменение характеристик грунта при промерзании. Сопоставление результатов численного моделирования в условиях промерзания грунта и наличия слоя снега с величиной тепловых потерь, рассчитанных с использованием методики [6], позволяет говорить о том, что отклонение между ними всегда является отрицательной величиной. Это обстоятельство свидетельствует о том, что методика [6] дает завышенные значения тепловых потерь бесканальных теплопроводов. В предельных случаях это отклонение составляет до минус 40,94 % и до минус 39,39 % при прокладке теплопроводов в песчаных и глинистых грунтах соответственно.

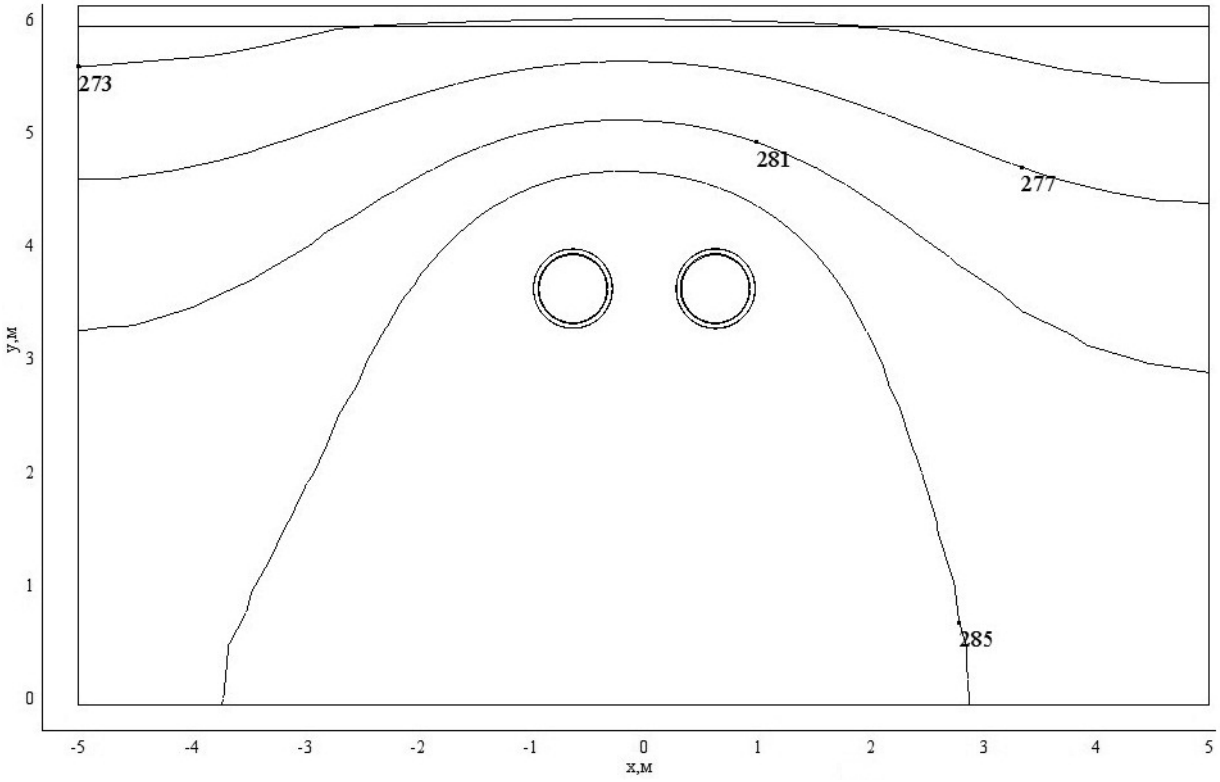

Рис.2 Типичное температурное поле для рассматриваемой области решения.

На рисунке 2, в качестве примера, приведено типичное температурное поле в зоне размещения бесканального теплопровода в условиях промерзания грунта и наличии слоя снега при прокладке в песчаном грунте и $\alpha = 5$ Вт/(м^2·К). На рисунке 2 изотермическая линия 273 К соответствует границе раздела мерзлых и талых сред.

Распределения температур в рассматриваемой области решения свидетельствуют о том, что изотермические линии (рисунок 2) сгущаются непосредственно над трубопроводами и более разрежены при удалении от них, что соответствует представлениям о процессах теплопроводности в твердых телах и качественно соответствует [12, 13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что в рамках рассматриваемой задачи тепловые потери бесканальных тепловых сетей в условиях промерзания грунта и наличии снежного покрова в зоне прокладки снижаются на 8,91 – 15,86 %, а увеличение интенсивности теплоотдачи на внешнем контуре в 6 раз приводит к росту тепловых потерь до 3,5 %.

Отклонение между тепловыми потерями бесканальных теплопроводов с учетом промерзания грунта и наличии слоя снега в зоне прокладки и тепловыми потерями, рассчитанными по методике [6], составляет около 35–40 %, что свидетельствует о необходимости корректировки действующих норм по проектированию тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей [6, 7].

Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности применения разработанного подхода к анализу тепловых режимов и тепловых потерь бесканальных тепловых сетей в условиях реальной эксплуатации и возможности его применения при создании энергосберегающих систем транспортировки тепла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кириллов Ю.И., Мотлохов М.А., Бычков А.М., Звонарев М.Г. Состояние тепловой изоляции на электростанциях ОАО РАО «ЕЭС России» // Энергетик. – 2005. – № 11. – С. 2 – 5. Kirillov, Iu.I., Motlohov, M.A., Bychkov, A.M., Zvonarev, M.G. (2005). «Thermal isolation in power plants of RAO «UES of Russia»», *Energetik*. no.11, pp.2-5.
2. Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. Анализ тепловых потерь теплотрубопроводов в условиях взаимодействия с влажным воздухом // Энергосбережение и водоподготовка. – 2009. – № 2. – С. 37 – 39. Kuznetcov, G.V. and Polovnikov, V.Iu. (2009).»Analysis of heat loss in piping interaction with moist air», *Energosberezhenie i vodopodgotovka*, no.2, pp.37-39.
3. Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. Оценка масштабов тепловых потерь в магистральных теплотрубопроводах в условиях затопления // Промышленная энергетика. – 2006. – № 8. – С. 32 – 34. Kuznetcov, G.V. and Polovnikov, V.Iu. (2006). «Assessment of the extent of heat loss in the main pipelines in flooded conditions», *Promyshlennaia energetika*, no.8, pp.32-34.
4. Ватин Н.И., Дубов В.В., Петраков Г.П. Внедрение РМД 41-11-2012 Санкт-Петербург «Устройство тепловых сетей в Санкт-Петербурге» // Интернет-журнал «Строительство уникальных зданий и сооружений». – 2013. – № 1(6). – С. 48–54. Watin, N.I., Dubov, V.V., Petrakov, G.P. (2013). «The introduction of RMD 41-11-2012 Saint Petersburg «The device heating networks in St. Petersburg»», *Internet-zhurnal «Stroitelstvo unikalnykh zdanii i sooruzhenii»*, no.1(6), pp.48-54.
5. Шишкин А. Н. О проекте федерального закона «О теплоснабжении» // Новости теплоснабжения. – 2010. – № 6. – С. 20–24. Shishkin, A. N. (2010). «The draft federal law «On Heat Supply»», *Novosti teplosnabzheniia*, no.6, pp.20-24.
6. СП 41-103-2000. Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. М.: Госстрой России, 2001. – 42 с. SP 41-103-2000. (2001). *Proektirovanie teplovoi izoliatcii oborudovaniia i truboprovodov* [Design of thermal insulation of equipment and pipelines], Gosstroi Rossii, Moscow, Russia.

© Половников В.Ю.

7. СНиП 41-03-2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. СПб.: Деан, 2004. – 61 с. SNiP 41-03-2003. (2004). *Teplovaia izoliatciia oborudovaniia i truboprovodov* [Thermal insulation of equipment and pipelines], Dean, Saint Petersburg, Russia.
8. Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей / под ред. А.А. Николаева. – Курган: Интеграл, 2010. – 357 с. Nikolaev, A.A. (2010). *Spravochnik proektirovshchika. Proektirovanie teplovykh setei* [Reference designer. Design of heating systems], Integral, Kurgan, Russia.
9. Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. Численное моделирование теплопереноса в зонах прокладки теплотрасс // Известия РАН. Энергетика. – 2012. – № 2. – С. 151 – 159. Kuznetcov, G.V. and Polovnikov, V.Iu. (2012). «Numerical modeling of heat transfer in the areas heating mains», *Izvestiia RAN. Energetika*, no.2, pp.151-159.
10. Слепченок В.С., Рондель А.Н., Шаповалов Н.И. Влияние различных эксплуатационных факторов на тепловые потери в бесканальных подземных трубопроводах тепловой сети // Новости теплоснабжения. – 2002. – № 6. – С. 18 – 23. Slepchenok, V.S., Rondel, A.N., Shapovalov, N.I. (2002). «The effect of different operational factors on heat loss in the channel-free thermal network of underground pipelines», *Novosti teplosnabzheniia*, no.6, pp.18-23.
11. Беляков В.А. Опыт и проблемы проектирования бесканальной и канальной прокладки теплопроводов в ППУ-изоляции // Новости теплоснабжения. – 2007. – № 6. – С. 32–33. Beliakov, V.A. (2007). «Experience and problems of designing and trenchless laying heating pipes to channel PUF insulation», *Novosti teplosnabzheniia*, no.6, pp.32-33.
12. Иванов В.В., Вершинин Л.Б. Распределение температур и тепловых потоков в зоне подземных теплотрасс // Вторая Российская национальная конференция по теплообмену: Теплопроводность, теплоизоляция. – М.: Издательство МЭИ, 1998. – Т. 7. – С. 103–105. Ivanov, V.V. and Vershinin, L.B. (1998). «The distribution of temperature and heat flow in the area of underground heating mains», *Vtoraia Rossiiskaia natcionalnaia konferentciia po teploobmenu: Teploprovodnost, teploizoliatciia*. MEI, Moscow, Russia.
13. Иванов В. В., Шкребко С. В. Моделирование тепловых процессов подземных бесканальных теплотрасс // Вторая Российская национальная конференция по теплообмену: Теплопроводность, теплоизоляция. – М.: Издательство МЭИ, 1998. – Т. 7. – С. 106–108. Ivanov, V. V. and Shkrebko, S. V. (1998). «Modeling of thermal processes heating mains underground channel-free», *Vtoraia Rossiiskaia natcionalnaia konferentciia po teploobmenu: Teploprovodnost, teploizoliatciia*. MEI, Moscow, Russia.
14. Половников В.Ю., Хузеев В.А. Тепловые потери бесканальных теплотрасс в условиях промерзания грунта в зоне прокладки // Известия вузов. Проблемы энергетики. - 2012. - №11-12. С. 64-71. Polovnikov, V.Iu. and Huzeev, V.A. (2012). «Heat loss heating mains in the channel-free conditions in the area of soil freezing «, *Izvestiia vuzov. Problemy energetiki*, no.11-12, pp.64-71.
15. СНиП 23-01-99. Строительная климатология. М.: Госстрой России, 2000. –57 с. SNiP 23-01-99. (2000). *Stroitelnaia climatologiia* [Building Climatology], Gosstroi Rossii, Moscow, Russia.
16. Гува А.Я. Краткий теплофизический справочник. Новосибирск: Сибвузиздат, 2002. – 300 с. Guva, A. Ia. (2002). *Kratkii teplofizicheskii` spravochnik* [A brief reference thermophysical], Sibvuzizdat, Novosibirsk, Russia.