Численный анализ влияния инженерных сооружений на тепловые потери бесканальных теплопроводов

К.т.н., доцент В.Ю. Половников;
магистрант Е.С. Глазырин,
ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Аннотация. Представлены результаты математического моделирования тепловых режимов бесканальных теплотрасс, проложенных в зонах влияния инженерных сооружений, а также численного анализа тепловых потерь рассматриваемых объектов.

Установлены закономерности теплопереноса в рассматриваемой системе и факторы, влияющие на интенсификацию потерь тепловой энергии. Выявлено, что тепловые потери бесканальных теплопроводов, проложенных в зонах влияния инженерных сооружений, уменьшаются в диапазоне от 1,53 до 10,79 % в зависимости от температуры внутри инженерного сооружения и геометрических характеристик рассматриваемой системы. Показано, что нормативная методика расчета тепловых потерь бесканальных теплопроводов дает завышенные величины потерь тепловой энергии.

Полученные результаты позволили сделать вывод о перспективности применения разработанного подхода к анализу тепловых режимов и тепловых потерь теплопроводов, находящихся в зоне влияния инженерных сооружений, и о возможности его применения при создании энергосберегающих систем транспортировки тепла.

Ключевые слова: математическое моделирование; бесканальные теплопроводы; тепловые потери; инженерные сооружения

Введение

В современной российской [1–4] и зарубежной [5–8] периодической литературе исследованиям по развитию и повышению эффективности систем теплоснабжения посвящено достаточно большое количество работ. При этом особое место занимают работы, связанные с анализом тепловых потерь в тепловых сетях [9–12].

В настоящее время известно [3], что уровень тепловых потерь при транспортировке теплоносителя в тепловых сетях РФ составляет 20–30%, в то время как в других странах он не превышает 6–8% [13]. Основными причинами такого положения являются высокий износ оборудования сетей теплоснабжения [14] и необходимость усовершенствования регламентирующей базы [15]. При этом основным мероприятием по снижению потерь тепла в тепловых сетях является применение перспективных конструкций теплопроводов и высокоэффективной тепловой изоляции [1, 4, 16–19]. Однако реализация этого мероприятия не приведет к устойчивому положительному эффекту без соответствующей корректировки действующих методов проектирования [20] тепловой изоляции теплопроводов различных конфигураций и назначения.

Действующая методика [20] основана на использовании упрощенных аналитических соотношений стационарной теплопроводности и в определенной мере далека от современных подходов к прогностическому моделированию тепловых режимов теплопроводов [11, 12, 17, 21, 22].

Одним из перспективных подходов к исследованию режимов работы теплопроводов в условиях реальной эксплуатации является использование разнообразных коммерческих или открытых пакетов прикладных программ, позволяющих учитывать различные эффекты и процессы, приводящие к интенсификации процессов переноса в рассматриваемых системах. Следует отметить, что за рубежом как минимум 30 лет назад [23] вследствие роста стоимости энергии отказались от использования упрощенных подходов к проектированию тепловой изоляции, и для каждого конкретного объекта с помощью специальных программных продуктов, учитывающих множество факторов, определяются экономически выгодные параметры изоляционной конструкции, вариант ее компоновки и размещения.

Целью работы является математическое моделирование тепловых режимов бесканальных теплопроводов, проложенных в зонах влияния инженерных сооружений (тепловые камеры, подвалы зданий), и численный анализ тепловых потерь рассматриваемых объектов в подобных условиях.

Постановка задачи

Рассматривается типичный теплопровод бесканальной прокладки – трубопроводы, изолированные пенополиуретаном и защитным покровным гидроизоляционным слоем из полиэтилена [24]. Предполагается, что теплопровод эксплуатируется в зоне размещения инженерного сооружения – отапливаемого подвала здания. На рисунке 1 показано схематическое изображение области решения рассматриваемой задачи.

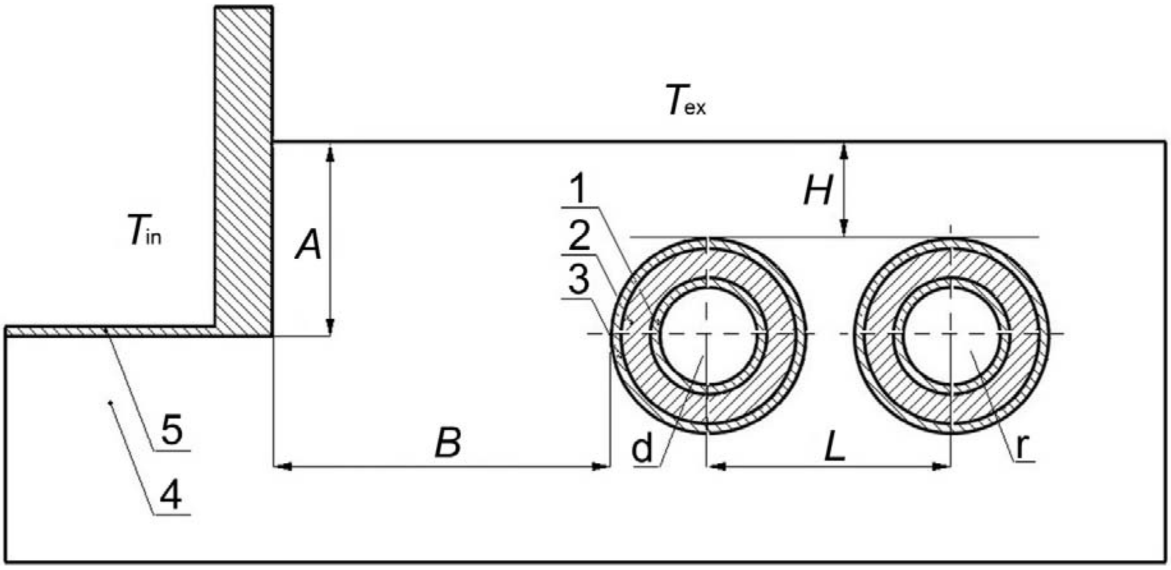

Рисунок 1. Схема поперечного сечения области решения:
1 – металлическая стенка трубы; 2 – теплоизоляционный слой; 3 – слой гидроизоляции; 4 – грунт; 5 – инженерное сооружение; d, r – подающий и обратный теплопроводы; *H* – расстояние от поверхности грунта до верхних точек слоев гидроизоляции; *L* – расстояние между осями теплопроводов; *A* – заглубление фундамента; *B* – расстояние от крайней точки теплопровода до инженерного сооружения

Для рассматриваемой области (рисунок 1) решается двумерная стационарная задача теплопроводности в системе «подземный бесканальный теплопровод – окружающая среда» с учетом наличия инженерных сооружений в зоне прокладки.

Следует отметить, что 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 [21, 22].

При постановке задачи приняты следующие допущения.

1. На границах между слоями выполняются условия идеального теплового контакта (рисунок 1).
2. Теплофизические свойства веществ являются постоянными и известными величинами.
3. Не рассматриваются процессы теплопереноса в теплоносителях подающего и обратного трубопроводов.
4. Потери тепла не влияют на температуру внутренней поверхности трубы. Считается, что на внутренней поверхности труб подающего и обратного трубопроводов поддерживаются постоянные температуры, равные температурам теплоносителей.

Принятые допущения не накладывают принципиальных ограничений на общность постановки задачи и отражают достаточно реальный режим работы бесканального трубопровода тепловой сети.

Математическая модель

Математическая модель базируется на традиционных подходах к моделированию физических процессов [11, 12, 21, 22, 25–27] и в предлагаемой постановке будет описываться следующими уравнениями:

$$\nabla^2 T_{d,p} = 0; \tag{1}$$

$$\nabla^2 T_{r,p} = 0; \tag{2}$$

$$\nabla^2 T_{d,i} = 0; \tag{3}$$

$$\nabla^2 T_{r,i} = 0; \tag{4}$$

$$\nabla^2 T_{d,h} = 0; \tag{5}$$

$$\nabla^2 T_{r,h} = 0; \tag{6}$$

$$\nabla^2 T_{g} = 0; \tag{7}$$

$$\nabla^2 T_{f} = 0. \tag{8}$$

На внутренних поверхностях подающего и обратного трубопроводов поддерживаются постоянные температуры, равные температурам теплоносителя в трубах:

$$T_{d,p,1} = T_d = const; \tag{9}$$

$$T_{r,p,1} = T_r = const. \tag{10}$$

На границах слоев реализуются условия идеального теплового контакта:

$$\lambda_p grad(T_{d,p,2}) = \lambda_i grad(T_{d,i,2}); T_{d,p,2} = T_{d,i,2}, \tag{11}$$

$$\lambda_p grad(T_{r,p,2}) = \lambda_i grad(T_{r,i,2}); T_{r,p,2} = T_{r,i,2}, \tag{12}$$

$$\lambda_i grad(T_{d,i,3}) = \lambda_h grad(T_{d,h,3}); T_{d,i,3} = T_{d,h,3}, \tag{13}$$

$$\lambda_i grad(T_{r,i,3}) = \lambda_h grad(T_{r,h,3}); T_{r,i,3} = T_{r,h,3}, \tag{14}$$

$$\lambda_h grad(T_{d,h,4}) = \lambda_g grad(T_{d,g,4}); T_{d,h,4} = T_{d,g,4}, \tag{15}$$

$$\lambda_h grad(T_{r,h,4}) = \lambda_g grad(T_{r,g,4}); T_{r,h,4} = T_{r,g,4}, \tag{16}$$

$$\lambda_g grad(T_{g,5}) = \lambda_f grad(T_{f,5}); T_{g,5} = T_{f,5}. \tag{17}$$

На поверхности разделов «грунт – окружающая среда», «внутренняя поверхность стены – воздух внутри инженерного сооружения», «поверхность пола – воздух внутри инженерного сооружения» и «внешняя поверхность стены – окружающая среда» реализуются условия конвективного теплообмена:

$$-\lambda_g grad(T_{g,6}) = \alpha_6 (T_{g,6} - T_{ex}); \tag{18}$$

$$-\lambda_f grad(T_{f,7}) = \alpha_7 (T_{f,7} - T_{in}); \tag{19}$$

$$-\lambda_f grad(T_{f,8}) = \alpha_8 (T_{f,8} - T_{in}); \tag{20}$$

$$-\lambda_f grad(T_{f,9}) = \alpha_9 (T_{f,9} - T_{ex}). \tag{21}$$

На внешних границах области решения (рисунок 1) градиенты температур равны нулю:

$$grad(T_g) = 0, x \to \pm\infty; y \to -\infty\ ; \quad (22)$$

$$grad(T_f) = 0, x \to -\infty; y \to +\infty\ . \quad (23)$$

Обозначения: *T* – температура, К; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·К).

Индексы: d – подающий; r – обратный; p – труба; i – изоляция; h – гидроизоляция; g – грунт; f – фундамент; in – внутренний; ex – наружный; 1 – внутренняя поверхность трубы; 2–9 соответственно границы разделов «труба – тепловая изоляция», «тепловая изоляция – гидроизоляция», «гидроизоляция – грунт», «грунт – фундамент», «грунт – окружающая среда», «внутренняя поверхность стены – воздух внутри инженерного сооружения», «поверхность пола – воздух внутри инженерного сооружения», «внешняя поверхность стены – окружающая среда».

Метод решения и исходные данные

Рассматриваемая задача (1)–(23) решена с применением средств и функций пакета программ мультифизического моделирования COMSOL Multiphysics с использованием модуля General Heat Transfer [28], базирующегося на решении задач методом конечных элементов [29, 30].

Исследования проводились на неравномерной конечно-элементной сетке, состоящей из 36015 элементов и 18038 узлов. Количество элементов выбиралось из условий сходимости решения, сгущение сетки проводилось с использованием подпрограммы Mesh COMSOL Multiphysics [28].

Несмотря на то, что при постановке задачи предполагалось использование области решения неограниченных размеров (выражения (22), (23)), при проведении численного моделирования использовалась расчетная область размерами 7 м по вертикали и 16 м по горизонтали. 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 наружным диаметром 0,377 м, изготовленных из стали 10 (толщина стенки 0,006 м), тепловая изоляция – пенополиуретан (толщина 0,0553 м) [24], покровный слой – полиэтилен толщиной 6,2 мм [24]. Расстояние от поверхности грунта до верхней части теплопроводов составляло *H* = 1,5 м (рисунок 1). Расстояние между осями трубопроводов составляло *L* = 0,65 м. Расстояние *B* от оболочки бесканальной прокладки до фундамента здания, выполненного из железобетона, принималось равным 2 и 5 м (рисунок 1), а заглубление фундамента составляло *A* = 2 м. Температуры внутренней поверхности трубы подающего и обратного теплопровода T_d и T_r принимались равными среднегодовым температурам теплоносителей в подающих и обратных трубопроводах водяных тепловых сетей [31], работающих по температурному графику 95/70 ºС. Температура окружающей среды принималась равной средней температуре воздуха за отопительный период в городе Томск T_{ex} = 264,35 К [32], а температура воздуха внутри инженерного сооружения составляла T_{in} = 275,15 К и 293,15 К. Согласно [33] коэффициенты теплоотдачи на внутренней поверхности ограждающих конструкций инженерного сооружения соответственно для стен и пола по грунту составляли α_7 = 8,7 Вт/(м^2·К) и α_8 = 4,5 Вт/(м^2·К), для наружной поверхности – α_9 = 23 Вт/(м^2·К), от грунта к окружающей среде – α_6 = 15 Вт/(м^2·К).

В таблице 1 приведены значения [34] теплопроводности (*λ*), теплоемкости (*C*) и плотности (*ρ*) грунта, фундамента (железобетон), стенки трубы, тепловой и гидроизоляции, использовавшиеся при проведении исследований.

Таблица 1. Теплофизические характеристики материалов

Материал	Покровный слой	Тепловая изоляция	Стенка трубы	Грунт	Железобетон
λ, Вт/(м·К)	0,33	0,033	50,2	1,5	1,54
***С*, Дж/(кг·К)**	2200	1470	462	1150	887
ρ, кг/м^3	920	50	7700	1960	2200

Результаты численного моделирования

Основные результаты численного исследования тепловых режимов бесканальных теплопроводов, проложенных в зоне влияния инженерных сооружений, приведены в таблице 2 и на рисунках 2–4.

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 сравнением полученных результатов с известными данными других авторов [35, 36]. Относительная погрешность расчетов во всех вариантах численного анализа не превышала 0,5 %, что является приемлемым при проведении исследований тепловых режимов систем транспортировки тепла.

В таблице 2 приведены значения тепловых потерь q_2 бесканального теплопровода, проложенного в зоне влияния инженерного сооружения (рисунок 1), а также проведено сравнение этих значений с потерями идентичного теплопровода при отсутствии близрасположенных инженерных сооружений q_1 и потерями бесканального теплопровода $q_{норм}$, рассчитанными по нормативной методике [20, 31].

Таблица 2. Результаты численного моделирования (q_1 = 74,74 Вт/м; $q_{норм}$ = 99,50 Вт/м)

B, м	T_{in}, К	q_2, Вт/м	$\delta_1 = \frac{q_1 - q_2}{q_1} 100\%$	$\delta_2 = \frac{q_{норм} - q_2}{q_{норм}} 100\%$
5	275,15	73,36	1,85	26,27
	293,15	70,96	5,06	28,68
2	275,15	72,17	3,44	27,47
	293,15	66,68	10,79	32,99

Результаты численного анализа тепловых потерь бесканального теплопровода, приведенные в таблице 2, свидетельствуют об ожидаемом уменьшении тепловых потерь q_2 теплопровода при его прокладке в зоне влияния инженерных сооружений. Анализ изменения величин тепловых потерь в зависимости от расстояния между оболочкой бесканальной прокладки и фундаментом здания позволяет сделать вывод о том, что уменьшение расстояния от 5 до 2 м приводит к снижению тепловых потерь на 1,62 % при температуре внутри инженерного сооружения T_{in} = 275,15 К и на 6,03 % при T_{in} = 293,15 К. Также наблюдается закономерное снижение потерь тепловой энергии с увеличением температуры воздуха внутри инженерного сооружения, в зоне влияния которого расположен теплопровод. При повышении температуры внутри инженерного сооружения от 275,15 до 293,15 К снижение тепловых потерь составляет 3,27 % при расстоянии между оболочкой бесканальной прокладки и фундаментом здания *B* = 5 м и на 7,61 % при *B* = 2 м.

Сопоставление значений q_1 и q_2 (таблица 2) говорит о том, что тепловые потери бесканальных теплопроводов, проложенных в зонах влияния инженерных сооружений, уменьшаются в диапазоне от δ_1 = 1,53 % до δ_1 = 10,79 % в зависимости от значений T_{in} и *B*.

Сравнение результатов расчета тепловых потерь бесканального теплопровода, проложенного в зоне влияния инженерного сооружения q_2, с тепловыми потерями $q_{норм}$, полученными с использованием методики [20, 31], свидетельствует о том, что методика [20, 31] дает завышенные значения тепловых потерь бесканальных теплопроводов. В предельных случаях отклонение δ_2 составляет от 26,27 до 32,99 %.

На рисунках 2–4 в качестве примеров приведены типичные температурные поля в зоне размещения бесканального теплопровода при отсутствии близрасположенных инженерных сооружений (рис. 2) и при их наличии (рис. 3, 4).

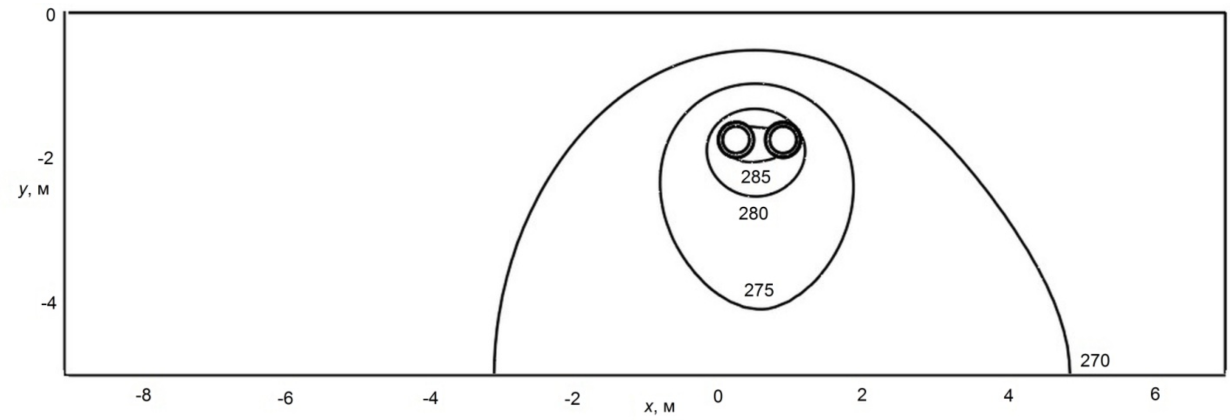

Рисунок 2. Температурное поле в зоне прокладки бесканального теплопровода

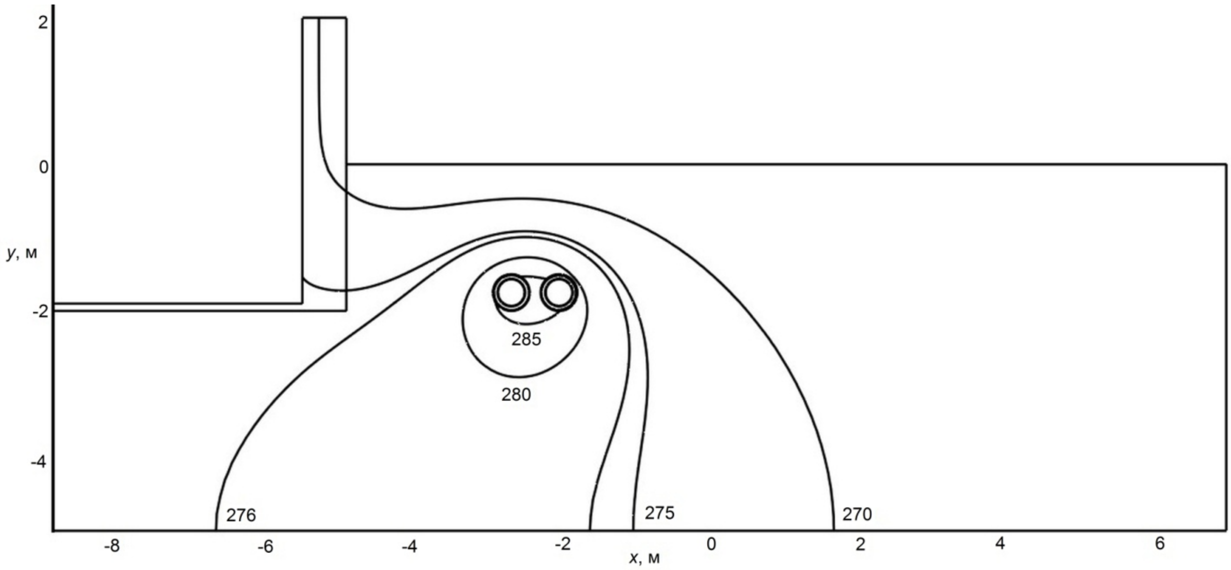

Рисунок 3.Температурное поле в зоне прокладки бесканального теплопровода при наличии близрасположенных инженерных сооружений (*B* = 2 м, T_{in} = 275,15 К)

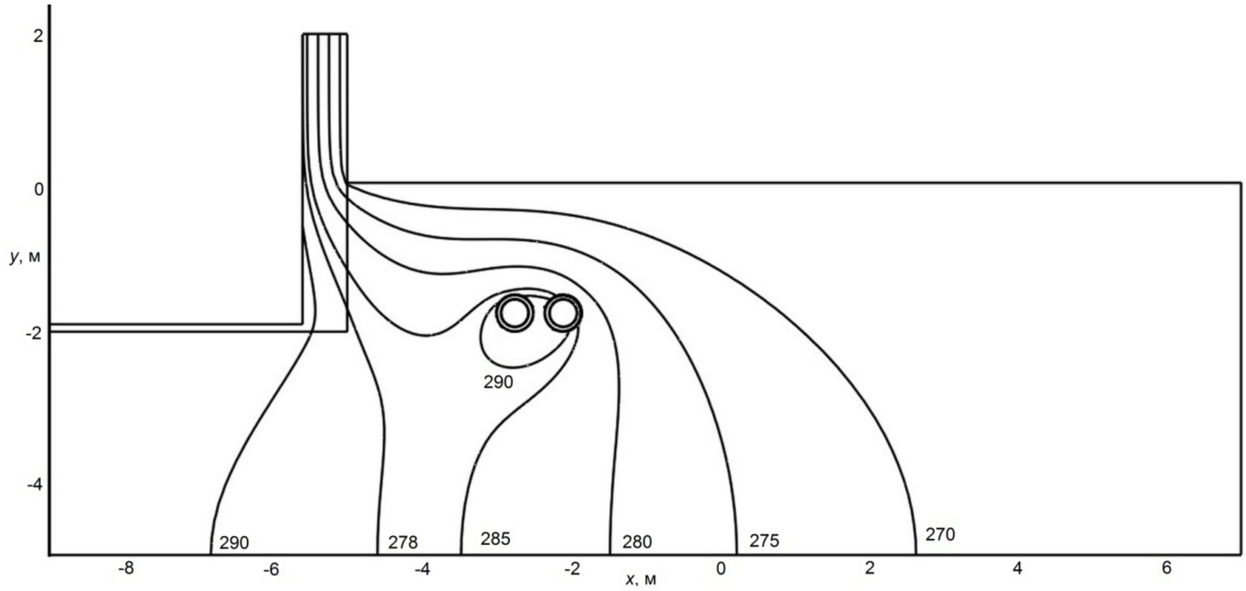

Рисунок 4. Температурное поле в зоне прокладки бесканального теплопровода при наличии близрасположенных инженерных сооружений (*B* = 2 м, T_{in} = 293,15 К)

Распределения температур в рассматриваемых областях решения свидетельствуют о том, что изотермические линии (рис. 2–4) сгущаются непосредственно над трубопроводами, а также вблизи инженерного сооружения и более разрежены при удалении от них, что соответствует представлениям о процессах теплопроводности и хорошо согласуется с результатами предыдущих исследований [21, 22] и теоретическими работами других авторов [35, 36]. При этом необходимо отметить, что в работах [35, 36] приведено недостаточно сведений для детализированного количественного сопоставления результатов моделирования с данными исследований.

Следует еще раз отметить, что результаты проведенных исследований тепловых потерь бесканальных теплопроводов (таблица 2) позволяют сделать вывод о том, что методика [20, 31] является недостаточно корректной и дает завышенные значения тепловых потерь. По этой причине можно рекомендовать ужесточение норм тепловых потерь для бесканальных теплопроводов.

В заключение необходимо сказать о том, что только повсеместное внедрение энергосберегающих мероприятий в различных областях строительства [1–12, 21–23, 35–38] позволит выполнить программу энергосбережения РФ, повысить эффективность производств, эффективно использовать энергию, время, ресурсы и т. д. При этом менее затратным и наиболее быстрым способом анализа перспективности внедрения энергосберегающих мероприятий является использование пакетов прикладных программ, позволяющих учитывать различные эффекты и процессы, приводящие к интенсификации процессов переноса в рассматриваемых системах.

Заключение

Проведен численный анализ тепловых режимов и тепловых потерь бесканальных теплопроводов, расположенных в зоне влияния инженерных сооружений.

Установлено, что в рамках предложенной модели тепловые потери теплопровода, находящегося в зоне влияния отапливаемого подвала здания, уменьшаются в диапазоне от 1,53 до 10,79 % в зависимости от температуры внутри инженерного сооружения и расстояния между оболочкой бесканальной прокладки и фундаментом здания.

Выявлено, что нормативная методика [20, 31] дает существенно завышенные значения тепловых потерь бесканальных теплопроводов. Отклонения результатов численного моделирования от данных методики [20, 31] составляют около 33 %.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности применения разработанного подхода к анализу тепловых режимов и тепловых потерь теплопроводов, находящихся в зоне влияния инженерных сооружений, и о возможности его применения при создании энергосберегающих систем транспортировки тепла.

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.

Литература

1. Слепченок В.С., Петраков Г.П. Повышение энергоэффективности теплоизоляции трубопроводов тепловых сетей северных и северо-восточных регионов России // Инженерно-строительный журнал. 2011. №4(22). С. 26–32.
2. Слепченок В.С., Петраков Г.П. Система теплоснабжения Санкт-Петербурга на современном этапе и возможности ее модернизации // Инженерно-строительный журнал. 2009. №7. С. 26–29.
3. Ватин Н.И., Дубов В.В., Петраков Г.П. Внедрение РМД 41-11-2012 Санкт-Петербург «Устройство тепловых сетей в Санкт-Петербурге» // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2013. №1(6). С. 48–54.
4. Королев И.А., Петраков Г.П. Создание испытательного центра для проверки качества пенополиуретановой изоляции предизолированных трубопроводов, применяемых в системах теплоснабжения // Инженерно-строительный журнал. 2010. №1. С. 23–25.

5. Rezaie B., Rosen M.A. District heating and cooling: Review of technology and potential enhancements // Applied Energy. 2012. Vol. 93. Pp. 2–10.

6. Magnusson D. Swedish district heating – A system in stagnation: Current and future trends in the district heating sector // Energy Policy. 2012. Vol. 48. Pp. 449–459.

7. Hawkey D.J.C. District heating in the UK: A Technological Innovation Systems analysis // Environmental Innovation and Societal Transitions. 2012. Vol. 5. Pp. 19–32.

8. Fahlén E., Ahlgren E. O. Accounting for external costs in a study of a Swedish district-heating system – An assessment of environmental policies // Energy Policy. 2010. Vol. 38. Pp. 4909–4920.

9. Comakli K., Yuksel B., Comakli O. Evaluation of energy and exergy losses in district heating network // Applied Thermal Engineering. 2004. V.24. No.7. Pp. 1009–1017.

10. Dalla Rosa A., Li H., Svendsen S. Method for optimal design of pipes for low- energy district heating, with focus on heat losses // Energy. 2011. Vol. 36. No.5. Pp. 2407–2418.

11. Kuznetzov G.V., Polovnikov V.Yu. Numerical Investigation of Thermal Regimes in Twin-Tube-Channel Heat Pipelines Using Conductive-Convective Model of Heat Transfer // Thermal Engineering. 2012. Vol. 59. No.4. Pp. 310–315.

12. Kuznetsov G.V., Polovnikov V.Yu. The conjugate problem of convective-conductive heat transfer for heat pipelines // Journal of Engineering Thermophysics. 2011. Vol. 20. No.2. Pp. 217–224.

13. Шишкин А. Н. О проекте федерального закона «О теплоснабжении» // Новости теплоснабжения. 2010. №6. С. 20–24.

14. Умеркин Г.Х., Дроздов С.А., Гончаров А.М., Демиденко Н.Н. Определение остаточного ресурса тепловых сетей по статистическим данным об авариях // Новости теплоснабжения. 2007. №11. С. 42–46.

15. Шойхет Б.М., Ставрицкая Л.В. О нормативной базе промышленной тепловой изоляции // Энергосбережение. 2003. №6. С. 86–89.

16. Байбаков С А., Тимошкин А.С. Основные направления повышения эффективности тепловых сетей // Электрические станции. 2004. №7. С. 19–25.

17. Eriksson D., Sunden B. Heat and mass transfer in polyurethane insulated district cooling and heating pipes // Journal of Building physics. 1998. Vol. 22. No.1. Pp. 110–131.

18. Emmanuel C. Nsofor & Veera Vijay Pipe Insulation Model for Energy Conservation in Buildings // Energy Engineering. 2011. Vol. 108. No.3. Pp. 37–50.

19. Lotz W.A. Pipe insulation specification process // Heating, Piping, Air Conditioning Engineering. 2003. Vol. 75. No.10. Pp. 58–59.

20. СНиП 41-03-2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. СПб.: Деан, 2004. 61 с.

21. Половников В.Ю., Хузеев В.А. Численный анализ влияния промерзания грунта в зоне прокладки на тепловые потери бесканальных теплопроводов // Инженерно-строительный журнал. 2013. №2(37). С. 19–24.

22. Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. Численное моделирование теплопереноса в зонах прокладки теплотрасс // Известия РАН. Энергетика. 2012. №2. С. 151–159.

23. Козлов Ю.В. Тепловая изоляция энергооборудования // Энергетическое строительство за рубежом. 1983. №4. С. 25–30.

24. Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей / Под ред. А.А. Николаева. Курган: Интеграл, 2010. 357 с.

25. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Transient heat and mass transfer at the ignition of vapor and gas mixture by a moving hot particle // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010. Vol. 53. No.5-6. Pp. 923–930.

26. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Distinctive features of the gas-phase ignition of a mixture of a kerosene vapor and air by a steel wire heated to high temperatures // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2009. Vol. 82. No.6. Pp. 1059–1065.

27. Glushkov D.O., Strizhak P.A. Heat and Mass Transfer at Ignition of Solid Condensed Substance with Relatively Low Calorific Power by a Local Energy Source // Journal of Engineering Thermophysics. 2012. Vol. 21. No.1. Pp. 69–77.

28. Бирюлин Г.В. Теплофизические расчеты в конечно-элементном пакете COMSOL/FEMLAB. СПб.: СПбГУИТМО, 2006. 89 с.

29. Garcia A.L. Numerical methods for physics. New York: Prentice Hall, 2000. 423 p.
30. Reddy J.N. An Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis. New York: Oxford University Press, 2004. 480 p.
31. СП 41-103-2000. Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. М.: Госстрой России, 2001. 42 с.
32. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: Изд-во МЭИ, 2001. 472 с.
33. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий. М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004. 46 с.
34. Гува А.Я. Краткий теплофизический справочник. Новосибирск: Сибвузиздат, 2002. 300 с.
35. 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.
36. 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.
37. Ватин Н.И., Немова Д.В., Рымкевич П.П., Горшков А.С. Влияние уровня тепловой защиты ограждающих конструкций на величину потерь тепловой энергии в здании // Инженерно-строительный журнал. 2012. №8(34). С. 4–14.
38. Горшков А.С. Энергоэффективность в строительстве: вопросы нормирования и меры по снижению энергопотребления зданий // Инженерно-строительный журнал. 2010. №1. С. 9–13.

Вячеслав Юрьевич Половников, г. Томск, Россия
+7(3822)420833; эл. почта: polov@tpu.ru

Евгений Сергеевич Глазырин, 634050, г. Томск, Россия
+7(3822)420833; эл. почта: evgen2103@sibmail.com

doi: 10.5862/MCE.46.2

Numerical analysis of the impact of engineering constructions on heat loss of channel-free heat pipelines

V.Yu. Polovnikov
National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
+7(3822)420833; e-mail: polov@tpu.ru
E.S. Glazyrin
National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
+7(3822)420833; evgen2103@sibmail.com

Key words

mathematical modeling; channel-free heat pipelines; heat loss; engineering constructions

Abstract

The work shows the results of mathematical modelling of thermal conditions for channel-free heating network laid in the areas of influence of engineering constructions, as well as the results of numerical analysis of heat losses in the objects under examination.

The regularities of heat transfer in the system concerned and the factors influencing intensification of heat losses are revealed. The heat losses in channel-free pipes laid in the areas of engineering constructions influence have been found to decrease in the range from 1.53 to 10.79%, depending on the temperature inside any given engineering structure and geometric characteristics of the system under examination.

It is demonstrated that the standard method of heat loss calculation for channel-free heating pipes overestimates values of heat loss.

References

1. Slepchenok V.S., Petrakov G.P. *Magazine of Civil Engineering*. 2011. No. 4(22). Pp. 26–32. (rus)
2. Slepchenok V.S., Petrakov G.P. *Magazine of Civil Engineering*. 2009. No. 7. Pp. 26–29. (rus)
3. Vatin N.I., Dubov V.V., Petrakov G.P. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2013. No. 1(6). Pp. 48–54. (rus)
4. Korolev I.A., Petrakov G.P. *Magazine of Civil Engineering*. 2010. No. 1. Pp. 23–25. (rus)
5. Rezaie B., Rosen M.A. District heating and cooling: Review of technology and potential enhancements. *Applied Energy*. 2012. Vol. 93. Pp. 2–10.
6. Magnusson D. Swedish district heating – A system in stagnation: Current and future trends in the district heating sector. *Energy Policy*. 2012. Vol. 48. Pp. 449–459.
7. Hawkey D.J.C. District heating in the UK: A Technological Innovation Systems analysis. *Environmental Innovation and Societal Transitions*. 2012. Vol. 5. Pp. 19–32.
8. Fahlén E., Ahlgren E.O. Accounting for external costs in a study of a Swedish district-heating system – An assessment of environmental policies. *Energy Policy*. 2010. Vol. 38. Pp. 4909–4920.
9. Comakli K., Yuksel B., Comakli O. Evaluation of energy and exergy losses in district heating network. *Applied Thermal Engineering*. 2004. Vol. 24. No.7. Pp. 1009–1017.
10. Dalla Rosa A., Li H., Svendsen S. Method for optimal design of pipes for low- energy district heating, with focus on heat losses. *Energy*. 2011. Vol. 36. No. 5. Pp. 2407–2418.
11. Kuznetzov G.V., Polovnikov V.Yu. Numerical Investigation of Thermal Regimes in Twin-Tube-Channel Heat Pipelines Using Conductive-Convective Model of Heat Transfer. *Thermal Engineering*. 2012. Vol. 59. No. 4. Pp. 310–315.
12. Kuznetsov G.V., Polovnikov V.Yu. The conjugate problem of convective-conductive heat transfer for heat pipelines. *Journal of Engineering Thermophysics*. 2011. Vol. 20. No. 2. Pp. 217–224.
13. Shishkin A.N. *Novosti teplosnabzheniya*. 2010. No. 6. Pp. 20–24. (rus)
14. Umerkin G.H., Drozdov S.A., Goncharov A.M., Demidenko N.N. *Novosti teplosnabzheniya*. 2007. No. 11. Pp. 42–46. (rus)

15. Shoikhet B.M., Stavritskaia L.V. *Energosberezheniye*. 2003. No. 6. Pp. 86–89. (rus)

16. Baibakov S.A., Timoshkin A.S. *Elektricheskie stantsii*. 2004. No. 7. Pp. 19–25. (rus)

17. Eriksson D., Sunden B. Heat and mass transfer in polyurethane insulated district cooling and heating pipes. *Journal of Building physics*. 1998. Vol. 22. No. 1. Pp. 110–131.

18. Emmanuel C. Nsofor, Veera Vijay. Pipe Insulation Model for Energy Conservation in Buildings. *Energy Engineering*. 2011. Vol. 108. No. 3. Pp. 37–50.

19. Lotz W.A. Pipe insulation specification process. *Heating, Piping, Air Conditioning Engineering*. 2003. Vol. 75. No. 10. Pp. 58–59.

20. *SNiP 41-03-2003. Teplovaya izoliatciya oborudovaniya i truboprovodov* [Building code 41-03-2003. Thermal insulation of equipment and pipelines]. Saint-Petersburg: Dean, 2004. 61 p. (rus)

21. Polovnikov V.Yu., Huzeev V.A. *Magazine of Civil Engineering.* 2013. No. 2(37). Pp. 19–24. (rus)

22. Kuznetzov G.V., Polovnikov V.Yu. *Izvestiya RAN. Energetika*. 2012. No 2. Pp. 151–159. (rus)

23. Kozlov Yu. B. *Energeticheskoye stroitelstvo za rubezhom*. 1983. No. 4. Pp. 25–30. (rus)

24. *Spravochnik proektirovschika. Proektirovaniye teplovyh setey* [Directory of the designer. Designing of thermal networks] Edited by A.A. Nikolaev. Kurgan: Integral, 2010. 357 p. (rus)

25. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Transient heat and mass transfer at the ignition of vapor and gas mixture by a moving hot particle. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010. Vol. 53. No. 5–6. Pp. 923–930.

26. Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Distinctive features of the gas-phase ignition of a mixture of a kerosene vapor and air by a steel wire heated to high temperatures. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2009. Vol. 82. No. 6. Pp. 1059–1065.

27. Glushkov D.O., Strizhak P.A. Heat and Mass Transfer at Ignition of Solid Condensed Substance with Relatively Low Calorific Power by a Local Energy Source. *Journal of Engineering Thermophysics*. 2012. Vol. 21. No. 1. Pp. 69–77.

28. Biriulin G.V. *Teplofizicheskiye raschety v qonechno-elementnom pakete COMSOL/FEMLAB* [Thermophysical calculations in finite element package COMSOL/FEMLAB]. Saint-Petersburg: SPbGUITMO, 2006. 89 p. (rus)

29. Garcia A.L. *Numerical methods for physics*. New York: Prentice Hall, 2000. 423 p.

30. Reddy J. N. *An Introduction to Nonlinear Finite Element Analysis*. New York: Oxford University Press, 2004. 480 p.

31. *SP 41-103-2000. Proektirovanie teplovoi izolyacii oborudovaniya i truboprovodov* [Set of rules 41-103-2000. Design of thermal insulation of equipment and pipelines]. Moscow: Gosstroy Rossii, 2001. 42 p. (rus)

32. Sokolov E.Ya. *Teplofikatsiya i teplovyye seti* [District heating and heat networks]. Moscow: MEI, 2001. 472 p. (rus)

33. *SNiP 23-02-2003. Teplovaya zashchita zdaniy* [Building code 23-02-2003. Thermal protection of buildings]. Moscow: Gosstroy Rossii, 2004. 46 p. (rus)

34. Guva A.Ya. *Kratkiy teplofizicheskiy spravochnik* [The short guide thermophysical]. Novosibirsk: Sibvuzizdat, 2002. 300 p. (rus)

35. Ivanov V.V., Vershinin L.B. *Vtoraya Rossiyskaya natsionalnaya konferentsiya po teploobmenu* [Second Russian National Conference on Heat Transfer]. Moscow: Izdatelstvo MPEI, 1998. Vol. 7. Pp. 103–105. (rus)

36. Ivanov V. V., Shkrebko S.V. *Vtoraya Rossiyskaya natsionalnaya konferentsiya po teploobmenu: Teploprovodnost, teploizolyatsiya* [Second Russian National Conference on Heat Transfer: Heat conduction, heat insulation]. Moscow: Izdatelstvo MPEI, 1998. Vol. 7. Pp. 106–108. (rus)

37. Vatin N.I., Nemova D.V., Rymkevich P.P., Gorshkov A.S. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. No. 8(34). Pp. 4-14. (rus)

38. Gorshkov A.S. *Magazine of Civil Engineering*. 2010. No. 1. Pp. 9–13. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 5–13