

УДК 621.643.001:536.2

ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С УЧЕТОМ РЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ТЕПЛООБМЕНА НА ВНЕШНЕМ КОНТУРЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Половников Вячеслав Юрьевич,
polov@tpu.ru

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки новых подходов к анализу тепловых режимов и тепловых потерь подземных трубопроводов и подтверждается основными положениями Энергетической стратегии России на период до 2030 г. Подземные трубопроводы широко используются при транспортировке жидкостей в различных областях, например, таких как водоснабжение и теплоснабжение, нефтепроводы и газопроводы, технологические трубопроводы промышленных предприятий. При проектировании систем такого рода необходимо учитывать теплообмен между грунтом и подземным трубопроводом, что во многих случаях оказывает существенное влияние на экономичность транспортировки энергоносителей.

Цель: численный анализ тепловых режимов и тепловых потерь подземных бесканальных трубопроводов с учетом реальных условий теплообмена на внешнем контуре взаимодействия, исследование температурных полей и закономерностей теплопереноса в зонах размещения подземных бесканальных трубопроводов.

Объекты: типичные для систем транспортировки энергоносителей подземные двухтрубные бесканальные трубопроводы, проложенные в песчаных и глинистых грунтах. Трубопроводы изолированы пенополиуретаном и защитным покровным гидроизоляционным слоем из полиэтилена. Температуры на внутренней поверхности труб равны среднегодовым температурам энергоносителей в подающих и обратных трубопроводах водяных тепловых сетей при их работе по температурному графику 95/70 °С. Температура окружающей среды равна средней температуре воздуха за отопительный период в городе Томск. Средний коэффициент теплоотдачи на поверхности раздела «грунт – окружающая среда» варьировался в пределах от 5 до 30 Вт/(м²·К).

Методы: численное решение задач теплопереноса методом конечных элементов с использованием аппроксимации Галеркина, неравномерной конечно-элементной сетки, количество элементов которой выбирается из условий сходимости решения, гущение сетки проводится методом Делоне.

Результаты. Установлены масштабы тепловых потерь и закономерности теплопереноса в зонах размещения подземных бесканальных трубопроводов с учетом реальных условий теплообмена на внешнем контуре взаимодействия (изменение температуры грунта по глубине). Выявлено, что тепловые режимы подземных бесканальных трубопроводов с учетом и без учета изменения температуры грунта по глубине существенно отличаются друг от друга. Это обстоятельство может оказать заметное влияние в тех случаях, когда в зоне теплового влияния подземных трубопроводов расположены, например, смежные коммуникации или инженерные сооружения. Показана возможность проведения оценки тепловых потерь подземных бесканальных трубопроводов с использованием модели и методики, не учитывающих изменение условий теплообмена на внешнем контуре взаимодействия.

Ключевые слова:

Системы транспортировки тепловой энергии, подземные трубопроводы, тепловые потери, математическое моделирование, теплоперенос.

Введение

Подземные трубопроводы широко используются при транспортировке жидкостей в различных областях, например, таких как водо- и теплоснабжение, нефте- и газопроводы, технологические трубопроводы промышленных предприятий и др. При проектировании систем такого рода необходимо учитывать теплообмен между грунтом и подземным трубопроводом, что во многих случаях оказывает существенное влияние на экономичность транспортировки жидкостей [1]. Например, рост тепловых потерь от нефтепроводов приводит к изменению вязкости нефти из-за снижения ее температуры и, следовательно, к увеличению потребления электроэнергии перекачивающими насосами [1], а одной из причин перерасхода топлива, затрачиваемого на производство тепловой энергии, является интенсификация потерь в сетях теплоснабжения [2–4].

В настоящее время большое количество исследований посвящено тепловым режимам и тепловым потерям подземных трубопроводов [1–17]. В этих работах исследовано влияние различных факторов на эксплуатацию подземного трубопро-

водного транспорта: теплоперенос в грунте [1–4], влажность грунта [5], промерзание грунта [6], влияние периодического изменения температуры окружающей среды [7], замораживание трубопроводов [8], конвективного движения воздуха в каналах для прокладки трубопроводов [9], нестационарности процессов теплопереноса [10], а также, с учетом целого ряда допущений, создана методика прогнозирования тепловых потерь подземных трубопроводов [11–14]. Рассматриваемые задачи, наряду с аналитическими подходами [15–17], преимущественно решались численными методами.

Одним из допущений, при котором решены задачи теплопереноса [1–17], является допущение о том, что на внешнем контуре взаимодействия в грунте на некотором расстоянии от подземных трубопроводов градиент температуры равен нулю. Это допущение является недостаточно обоснованным, поскольку известно о значительном изменении температур грунта по глубине [18, 19].

Целью данной работы является численный анализ тепловых режимов и тепловых потерь подземных трубопроводов с учетом реальных условий теплообмена на внешнем контуре взаимодействия.

Постановка задачи

Рассматривается типичная бесканальная прокладка тепловой сети – трубопроводы, изолированные пенополиуретаном и защитным покровным гидроизоляционным слоем из полиэтилена [6, 17]. Схематическое изображение области решения приведено на рис. 1 и соответствует области решения для задачи, описанной в [6]. Для рассматриваемой области (рис. 1) решается двумерная стационарная задача теплопереноса в системе «подземный бесканальный трубопровод – окружающая среда» с учетом реальных условий теплообмена на внешнем контуре взаимодействия.

При постановке задачи приняты следующие допущения:

1. На границах между слоями выполняются условия идеального теплового контакта.
2. Теплофизические свойства веществ являются постоянными и известными величинами.
3. Не рассматриваются процессы теплопереноса в энергоносителях подающего и обратного трубопроводов.
4. На внутренних поверхностях труб подающего и обратного трубопроводов поддерживаются постоянные температуры, равные температурам энергоносителей.

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

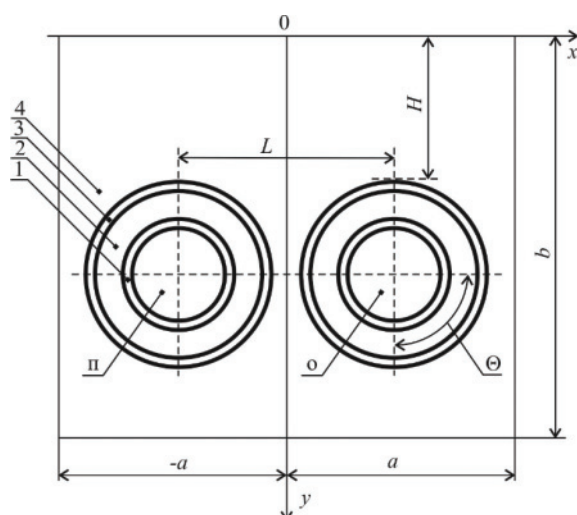


Рис. 1. Схема области решения: 1) металлическая стенка трубы; 2) теплоизоляционный слой; 3) слой гидроизоляции; 4) грунт; п, о – подающий и обратный теплопроводы; H – расстояние от поверхности грунта до верхних точек слоев гидроизоляции; L – расстояние между осями трубопроводов; a, b – размеры области решения

Fig. 1. Scheme of solution region: 1) metal wall of the pipe; 2) heat-insulating layer; 3) waterproofing layer; 4) soil; п, о are the supply and return heat pipes; H is the distance from the soil surface to the upper points of the waterproofing layers; L is the distance between the axes of the pipes; a, b are the sizes of the solution region

Математическая модель

Математическая постановка задачи для рассматриваемой области решения (рис. 1) будет описываться уравнениями теплопроводности в цилиндрической системе координат для стенок труб, теплоизоляционных и гидроизоляционных слоев подающего и обратного трубопроводов:

$$\frac{\partial^2 T_{i,n}}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial T_{i,n}}{\partial x} + \frac{1}{x^2} \frac{\partial^2 T_{i,n}}{\partial \Theta^2} = 0, \quad i=1-3, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 T_{i,o}}{\partial x^2} + \frac{1}{x} \frac{\partial T_{i,o}}{\partial x} + \frac{1}{x^2} \frac{\partial^2 T_{i,o}}{\partial \Theta^2} = 0, \quad i=1-3; \quad (2)$$

в грунте уравнением теплопроводности в декартовой системе координат:

$$\frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_4}{\partial y^2} = 0. \quad (3)$$

При постановке задачи принималось, что на внутренних поверхностях труб подающего и обратного трубопроводов поддерживается постоянная температура, равная температуре теплоносителя в трубе:

$$T_{i,n} = T_n = \text{const}, \quad (4)$$

$$T_{i,o} = T_o = \text{const}. \quad (5)$$

На границах слоев реализуются условия идеального теплового контакта:

$$\lambda_i \frac{\partial T_{i,n}}{\partial x} = \lambda_j \frac{\partial T_{j,n}}{\partial x}, \quad T_{i,n} = T_{j,n}, \quad i, j=1-4; i \neq j; \quad (6)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_{i,n}}{\partial y} = \lambda_j \frac{\partial T_{j,n}}{\partial y}, \quad T_{i,n} = T_{j,n}, \quad i, j=1-4; i \neq j; \quad (7)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_{i,o}}{\partial x} = \lambda_j \frac{\partial T_{j,o}}{\partial x}, \quad T_{i,o} = T_{j,o}, \quad i, j=1-4; i \neq j; \quad (8)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_{i,o}}{\partial y} = \lambda_j \frac{\partial T_{j,o}}{\partial y}, \quad T_{i,o} = T_{j,o}, \quad i, j=1-4; i \neq j; \quad (9)$$

Для цилиндрических слоев выполняются условия симметрии:

$$\frac{\partial T_{i,n}}{\partial \Theta} = 0, \quad i=1-3; \quad (10)$$

$$\frac{\partial T_{i,o}}{\partial \Theta} = 0, \quad i=1-3; \quad (11)$$

На левой и правой границах рассматриваемой системы температура грунта зависит от глубины и описывается уравнением, полученным на основании обработки данных приведенных в [19]:

$$T = 270,3 - 2,125y, \quad \text{при } x=\pm a. \quad (12)$$

На поверхности раздела «грунт – окружающая среда» реализуются условия конвективного теплообмена:

$$-\lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial y} = \alpha(T_{4,b} - T_5), \quad \text{при } y=0. \quad (13)$$

На нижней поверхности задается постоянная температура, рассчитываемая по формуле (12):

$$T_{4,n} = T_n = \text{const, при } y=b. \quad (14)$$

Обозначения: T – температура, К; x, y, Θ – координаты; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К).

Индексы: 1–4 – номера областей расчета (рис. 1); 5 – окружающая среда; п, о – подающий и обратный трубопроводы, в, н – верхняя и нижняя границы.

Метод решения и исходные данные

Задача (1)–(14) решена методом конечных элементов с использованием аппроксимации Галерки на [20]. Исследования проводились на неравномерной конечно-элементной сетке, количество элементов выбиралось из условий сходимости решения, сгущение сетки проводилось методом Делоне [20].

Основное отличие задачи (1)–(14) от задачи, описанной в [6], заключается в учете наличия изменения температуры грунта по глубине (выражения (12) и (14)). При проведении численного моделирования использовалась расчетная область размерами $b = -6$ м в глубину и $a = \pm 5$ 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, конфигурация которых полностью соответствует описанной в [6]: диаметр условного прохода трубопроводов 600 мм, изготовлены из стали 10 (толщина стенки 8 мм), тепловая изоляция – пенополиуретан (толщина 40 мм), покровный слой – полиэтилен (2 мм). Расстояние от поверхности грунта до верхних точек слоев гидроизоляции принималось равным $H=2$ м, а между осями трубопроводов составляло $L=1,3$ м (рис. 1). Температуры $T_n=338$ К и $T_o=323$ К принимались равными среднегодовым температурам теплоносителей в подающих и обратных трубопроводах водяных тепловых сетей при их работе по температурному графику 95/70 °С [6, 17]. Температура окружающей среды T_s принималась равной средней температуре воздуха за отопительный период в городе Томск [17] – 264,2 К. Температура нижней границы области решения, вычисленная по формуле (12), составляла $T_n=283,05$ К. Средний коэффициент теплоотдачи на поверхности раздела «грунт – окружающая среда» варьировался в пределах от 5 до 30 Вт/(м²·К).

Таблица 1. Теплофизические характеристики [21]

Table 1. Thermophysical characteristics [21]

Материал Material	Покров- ный слой Cover layer	Тепловая изоляция Thermal insulation	Стенка трубы Pipe wall	Грунт/Soil	
				Глинистый Clay	Песчаный Sandy
λ , Вт/(м·К) W/(m·K)	0,33	0,033	50,2	1,1	2,3
c , Дж/(кг·К) J/(kg·K)	2200	1470	462	1231	1486
ρ , кг/м³ kg/m³	920	50	7700	1700	2000

В табл. 1 приведены значения [21] теплопроводности (λ), теплоемкости (c) и плотности (ρ) грунта, стенки трубы, тепловой и гидроизоляции, использовавшиеся при проведении численных исследований.

Результаты численного моделирования

Основные результаты численного анализа тепловых режимов и тепловых потерь подземных бесканальных трубопроводов с учетом реальных условий теплообмена на внешнем контуре взаимодействия приведены в табл. 2 и на рис. 2, 3.

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 данными других авторов, например [11–14], и предыдущими исследованиями [6, 9]. Относительная погрешность расчетов во всех вариантах численного анализа не превышала 0,2 %, что является приемлемым при анализе тепловых режимов и тепловых потерь подземных трубопроводов.

В табл. 2 в зависимости от значений коэффициентов теплоотдачи на верхней границе области решения и вида грунта в зоне размещения трубопроводов приведены тепловые потери рассматриваемой системы (рис. 1) Q_1 , полученные на основании решения системы уравнений (1)–(14), тепловые потери Q_2 [6], вычисленные для случая, когда изменение температуры грунта по глубине не учитывалось, а также представлено сопоставление Q_1 и Q_2 между собой и с нормативной величиной потерь Q_3 , рассчитанной в соответствии с [17, 19].

Таблица 2. Результаты численного моделирования

Table 2. Results of numerical simulation

Грунт Soil	α	Q_1 , Вт/м W/m	Q_2 [6], Вт/м W/m	Q_3 , Вт/м W/m	$\delta_2 =$ $\frac{Q_3 - Q_1}{Q_1} 100 \%$	$\delta_1 =$ $\frac{Q_1 - Q_2}{Q_2} 100 \%$
Песчаный Sandy	5	143,44	137,40	175,32	4,4	22,2
	10	144,75	140,48		3,0	21,1
	20	145,17	142,10		2,2	20,7
	30	145,87	142,65		2,3	20,2
Глинистый Clay	5	109,72	100,48	129,73	9,2	18,2
	10	110,38	102,15		8,0	17,5
	20	110,53	103,01		7,3	17,4
	30	110,84	103,30		7,3	17,0

Результаты численного моделирования тепловых потерь подземных бесканальных трубопроводов с учетом реальных условий теплообмена на внешнем контуре, приведенные в табл. 2, свидетельствуют об ожидаемом росте тепловых потерь при прокладке трубопроводов в песчаных грунтах, имеющих большие коэффициенты теплопроводности (табл. 1). Также наблюдается закономерное возрастание потерь тепловой энергии с ростом интенсивности теплоотдачи на внешнем контуре рассматриваемой системы (рис. 1).

Анализ изменения величин тепловых потерь в зависимости от значений коэффициентов теплоотдачи на границе раздела «грунт – окружающая среда» (табл. 2) позволяет сделать вывод о том, что увеличение теплоотдачи в 6 раз приводит к росту тепловых потерь не более чем на 2 %.

Сопоставление значений тепловых потерь подземных трубопроводов Q_1 и Q_2 позволяет сделать вывод о том, что при прокладке трубопроводов в песчаных грунтах потери тепла возрастают на $\delta_1=2,3-4,4$ %, а в глинистых на $\delta_1=7,3-9,2$ % в зависимости от значений коэффициентов теплоотдачи на внешнем контуре взаимодействия (табл. 2).

Необходимо отметить, что в нормативной методике расчета тепловых потерь подземных трубопроводов [17, 19] отсутствует возможность учета многих факторов, влияющих на интенсификацию процессов теплопереноса, например, изменение характеристик грунта и условий теплообмена на границе «грунт – окружающая среда», наличие перепада температур в грунте по глубине и другие. Сопоставление результатов (табл. 2) численного моделирования Q_1 с величиной тепловых потерь Q_3 позволяет говорить о том, что отклонение между ними δ_2 составляет около 20 %. Это обстоятельство свидетельствует о том, что методика [17, 19] дает существенно завышенные значения тепловых потерь для подземных трубопроводов.

На рис. 2 и 3, в качестве примеров, приведены типичные температурные поля в зоне размещения

подземных бесканальных трубопроводов с учетом (рис. 2) и без учета (рис. 3) изменения температуры глинистого грунта по глубине при $\alpha=30$ Вт/(м²·К).

Распределения температур в рассматриваемой области решения свидетельствуют о том, что изотермические линии (рис. 2, 3) сгущаются непосредственно над подземными трубопроводами и более разрежены при удалении от них, что соответствует представлениям о процессах теплопроводности и качественно согласуется с результатами предыдущих исследований [6, 9]. Рис. 2 наглядно демонстрирует существенную деформацию температурного поля в зоне прокладки подземных бесканальных трубопроводов с учетом изменения температуры грунта по глубине по сравнению с рис. 3, где этот фактор не учитывается. На рис. 3 изотермические линии смещены в сторону подающего трубопровода с более высокой температурой теплоносителя, а на рис. 2, для случая, когда учитывается изменение температуры грунта по глубине, температурное поле является практически симметричным относительно вертикальной оси рассматриваемой области решения.

Таким образом, тепловые режимы подземных бесканальных трубопроводов с учетом и без учета изменения температуры грунта по глубине существенно отличаются друг от друга. Это обстоятельство может оказать заметное влияние в тех случаях, когда в зоне теплового влияния подземных трубопроводов расположены, например, смежные коммуникации или инженерные сооружения. Од-

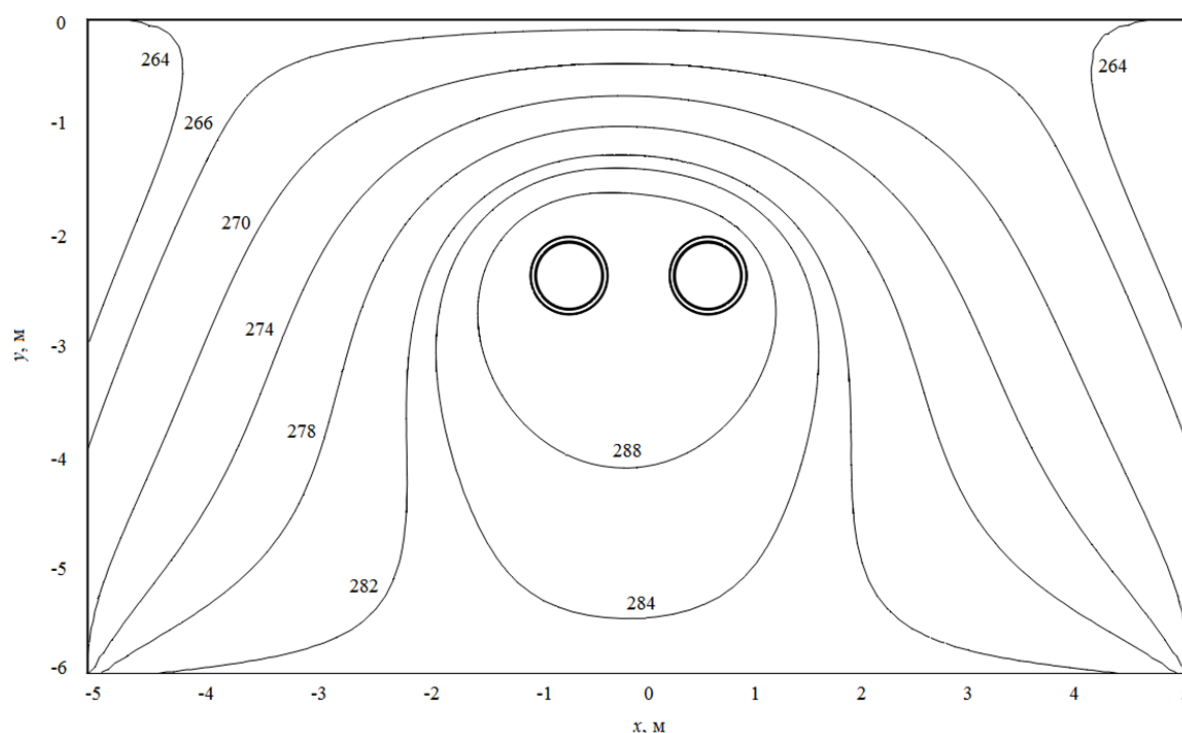


Рис. 2. Типичное температурное поле в зоне прокладки подземных трубопроводов с учетом изменения температуры грунта по глубине

Fig. 2. Typical temperature field in the zone of laying underground pipelines taking into account changes in soil temperature in depth

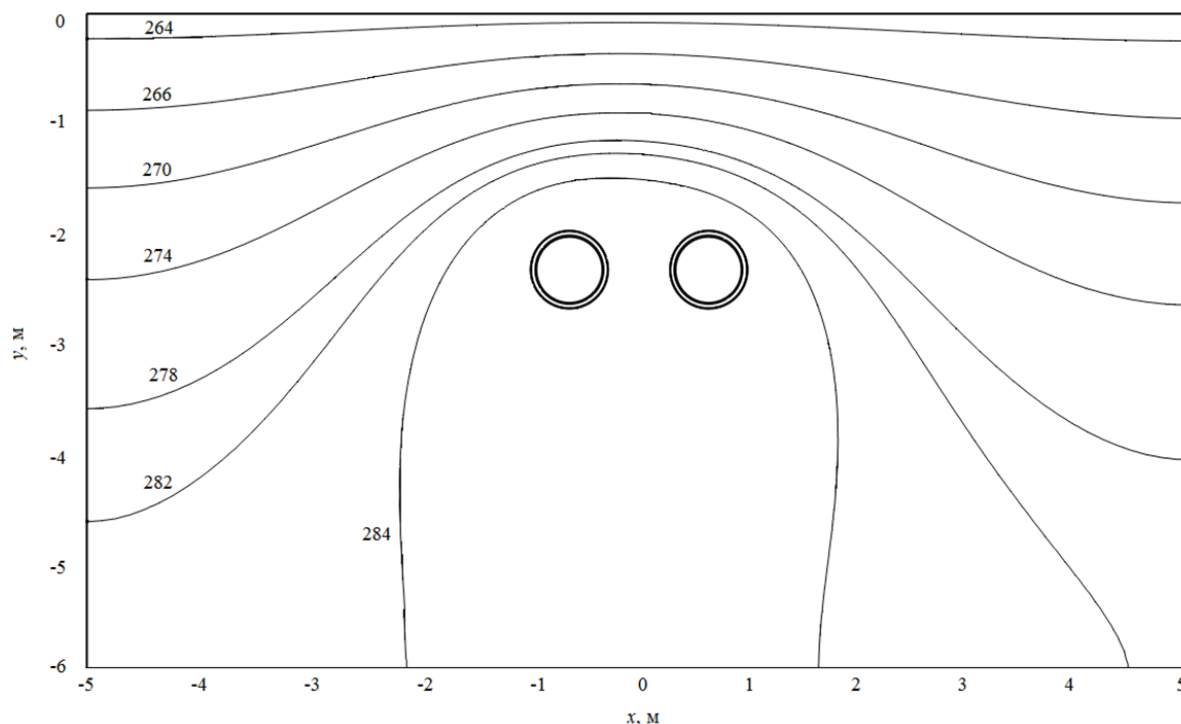


Рис. 3. Типичное температурное поле в зоне прокладки подземных трубопроводов без учета изменения температуры грунта по глубине

Fig. 3. Typical temperature field in the zone of laying underground pipelines neglecting changes in soil temperature in depth

нако при оценке тепловых потерь подземными трубопроводами, учитывая незначительное расхождение в расчетных значениях теплотер Q_1 и Q_2 (табл. 2), можно обоснованно использовать более простую модель [6].

Заключение

Установлены масштабы тепловых потерь и закономерности теплопереноса в зонах размещения подземных бесканальных трубопроводов с учетом реальных условий теплообмена на вне-

шнем контуре взаимодействия (изменение температуры грунта по глубине).

Показана возможность проведения оценки тепловых потерь подземных бесканальных трубопроводов с использованием модели и методики, не учитывающих изменение условий теплообмена на внешнем контуре взаимодействия.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-08-00229-а и Программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lu T., Wang K. Numerical analysis of the heat transfer associated with freezing/solidifying phase changes for a pipeline filled with crude oil in soil saturated with water during pipeline shut-down in winter // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2008. – V. 62. – № 1–2. – P. 52–58.
2. Akhmetova I.G., Chichirova N.D. Evaluation of thermal insulation type impact on the value of regulatory heat losses in heat and power systems // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2016. – V. 11. – № 13. – P. 2946–2949.
3. 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. – V. 36. – № 5. – P. 2407–2418.
4. Bohm B., Kristjansson H. Single, twin and triple buried heating pipes: on potential savings in heat losses and costs // *International Journal of Energy Research*. – 2005. – V. 29. – № 14. – P. 1301–1312.
5. Шкрёкко С.В. Влияние влажности грунта на тепловые режимы бесканальных теплотрасс // *Известия Ростовского государственного строительного университета*. – 1998. – № 2. – С. 174–175.
6. 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.
7. Barletta A., Zanchini E., Lazzari S., Terenzi A. Numerical study of heat transfer from an offshore buried pipeline under steady-periodic thermal boundary conditions // *Applied Thermal Engineering*. – 2008. – V. 28. – № 10. – P. 1168–1176.
8. Solving the problem of pipeline freezing with respect to external heat exchange / N. Parfentieva, K. Valancius, O. Samarin, S. Paulauskaitė, J. Ciuprinskienė // *Mechanika*. – 2015. – V. 21. – № 5. – P. 393–396.
9. Kuznetsov G.V., Polovnikov V.Yu. The conjugate problem of convective-conductive heat transfer for heat pipelines // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2011. – V. 20. – № 2. – P. 217–224.
10. Three-dimensional numerical model of heat losses from district heating network pre-insulated pipes buried in the ground / J. Danielewicz, B. Sniechowska, M.A. Sayegh, N. Fidorow, H. Jouhara // *Energy*. – 2016. – V. 108. – P. 172–184.

11. Иванов В.В., Василенко В.В., Черныш С.В. К оценке тепловых потерь подземных теплотрасс // Известия вузов. Строительство. – 2000. – № 1. – С. 66–69.
12. Дунин И.Л., Букаров Н.В. Расчет тепловых потерь при малых глубинах заложения теплопроводов // Известия ВУЗов. Строительство. – 1996. – № 2. – С. 83–84.
13. Определение тепловых потерь подземных канальных теплопроводов (Сообщение 1) / В.В. Иванов, В.И. Бабенков, И.Л. Дунин, К.В. Прушковский // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1990. – № 6. – С. 75–79.
14. Определение тепловых потерь подземных канальных теплопроводов (Сообщение 2) / В.В. Иванов, В.И. Бабенков, И.Л. Дунин, К.В. Прушковский // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1990. – № 8. – С. 89–93.
15. Bohm B. On transient heat losses from buried district heating pipes // International Journal of Energy Research. – 2000. – V. 24. – P. 1311–1334.
16. Muravyeva L., Vatin N. Elaboration of the method for safety assessment of subsea pipeline with longitudinal buckling // Advances in Civil Engineering. – 2016. – V. 2016. – Article ID 7581360.
17. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 472 с.
18. СНиП 2.01.01–82. Строительная климатология и геофизика. – М.: Стройиздат, 1983. – 57 с.
19. Водяные тепловые сети: Справочное пособие по проектированию / под ред. Н.К. Громова, Е.П. Шубина. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 376 с.
20. Garcia A.L. Numerical methods for physics. – San Jose CA: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015 – 432 с.
21. Гува А.Я. Краткий теплофизический справочник. – Новосибирск: Сибвузиздат, 2002. – 300 с.

Поступила 13.11.2017 г.

Информация об авторах

Половников В.Ю., кандидат технических наук, доцент Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDK 621.643.001:536.2

THERMAL REGIMES AND THERMAL LOSSES OF UNDERGROUND PIPELINES IN REAL HEAT EXCHANGE ON THE OUTER INTERACTION BOUNDARY

Viacheslav Yu. Polovnikov,
polov@tpu.ru

National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the research is caused by the need to develop new approaches to the study of thermal regimes and thermal losses of underground pipelines and it is confirmed by the main provisions of the Energy Strategy of Russia for the period up to 2030. Underground pipelines are widely used for transportation of liquids in various areas, for example, water supply and heat supply, oil pipelines and gas pipelines, technological pipelines of industrial enterprises. When designing an underground piping system, it is necessary to take into account heat exchange between the ground and the underground pipeline. In many cases this impacts significantly the economics of transportation of energy carriers.

The main aim of the research is a numerical analysis of thermal conditions and heat losses of underground channel-free pipelines in real heat exchange on the outer interaction boundary and investigation of temperature fields and patterns of heat transfer in the areas of placement of underground non-channel pipelines.

Objects of the research are the typical for energy transportation system underground two-pipe ductless pipelines laid in sandy and clay soils. Pipelines are insulated with polyurethane foam and protective covering waterproofing layer made of polyethylene. Temperature of energy carriers is equal to the average annual temperature of the energy carriers in the supply and return pipelines of the water heating networks during their operation according to the temperature schedule 95/70 °C. The ambient temperature is equal to the average air temperature for the heating period in the city of Tomsk. The average heat transfer coefficient at the ground-to-environment interface varied from 5 to 30 W/(m²·K).

Methods: numerical solution of heat transfer problems by the finite element method using the Galerkin approximation, non-uniform finite element mesh, the number of elements of mesh is chosen from the conditions of convergence of the solution; the grid is thickened by the Delaunay method.

Results. The authors have determined the magnitude of heat losses and the patterns of heat transfer in the zones of placement of underground non-channel pipelines in real heat exchange on the outer interaction boundary (change in soil temperature in depth). It was revealed that thermal conditions of underground non-channel pipelines, taking into account and without taking into account changes in soil temperature with respect to depth, differ significantly from each other. This circumstance can effect considerably in those cases where, for example, adjacent communications or engineering facilities are located in the zone of thermal influence of underground pipelines. The paper demonstrates the possibility of calculating thermal losses of underground non-channel pipelines using a model and methodology that do not take into account the change in heat exchange conditions on the outer interaction boundary.

Key words:

Thermal energy transportation system, underground pipelines, heat losses, mathematical modeling, heat transfer.

The study was partially supported by RFBR, research project No. 16–08–00229-a and within the framework of Tomsk Polytechnic University Competitiveness Enhancement Program.

REFERENCES

1. Lu T., Wang K. Numerical analysis of the heat transfer associated with freezing/solidifying phase changes for a pipeline filled with crude oil in soil saturated with water during pipeline shutdown in winter. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2008, vol. 62, no. 1–2, pp. 52–58.
2. Akhmetova I.G., Chichirova N.D. Evaluation of thermal insulation type impact on the value of regulatory heat losses in heat and power systems. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2016, vol. 11, no. 13, pp. 2946–2949.
3. 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.
4. Bohm B., Kristjansson H. Single, twin and triple buried heating pipes: on potential savings in heat losses and costs. *International Journal of Energy Research*, 2005, vol. 29, no. 14, pp. 1301–1312.
5. Shkrebko S.V. Influence of soil humidity on thermal conditions of non-channel heating mains. *Izvestiya of Rostov State Building University*, 1998, no. 2, pp. 174–175. In Rus.
6. Polovnikov V.Yu., Khuzeev V.A. Thermal losses of non-channel heating mains in conditions of ground freezing in the zone of laying. *Izvestiya Vuzov. Energy problems*, 2012, no. 11–12, pp. 64–71. In Rus.
7. Barletta A., Zanchini E., Lazzari S., Terenzi A. Numerical study of heat transfer from an offshore buried pipeline under steady-periodic thermal boundary conditions. *Applied Thermal Engineering*, 2008, vol. 28, no. 10, pp. 1168–1176.
8. Parfentjeva N., Valančius K., Samarin O., Paulauskaitė S., Čiuprinskienė J. Solving the problem of pipeline freezing with respect to external heat exchange. *Mechanika*, 2015, vol. 21, no. 5, pp. 393–396.
9. 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.
10. Danielewicz J., Sniechowska B., Sayegh M.A., Fidorow N., Jouhara H. Three-dimensional numerical model of heat losses from district heating network pre-insulated pipes buried in the ground. *Energy*, 2016, vol. 108, pp. 172–184.
11. Ivanov V.V., Vasilenko V.V., Chernyish S.V. To estimation of thermal losses of underground heating mains. *Izvestia Vuzov. Building*, 2000, no. 1, pp. 66–69. In Rus.
12. Dunin I.L., Bukarov N.V. Calculation of heat losses at shallow depths of heat pipelines. *Izvestia Vuzov. Building*, 1996, no. 2, pp. 83–84. In Rus.

13. Ivanov V.V., Babenkov V.I., Dunin I.L., Prushkovskiy K.V. Determination of thermal losses of underground duct heat pipes (Message 1). *Izvestia Vuzov. Construction and architecture*, 1990, no. 6, pp. 75–79. In Rus.
14. Ivanov V.V., Babenkov V.I., Dunin I.L., Prushkovskiy K.V. Determination of heat losses of underground duct heat pipes (Message2). *Izvestia Vuzov. Construction and architecture*, 1990, no. 8, pp. 89–93. In Rus.
15. Bohm B. On transient heat losses from buried district heating pipes. *International Journal of Energy Research*, 2000, vol. 24, pp. 1311–1334.
16. Muravyeva L., Vatin N. Elaboration of the method for safety assessment of subsea pipeline with longitudinal buckling. *Advances in Civil Engineering*, 2016, vol. 2016, Article ID 7581360.
17. Sokolov E.Ya. *Teplofikatsiya i teplovyye seti* [District heating and heat networks]. Moscow, MEI Publ., 2001. 472 p.
18. *SNiP 2.01.01–82. Stroitel'naya klimatologiya i geofizika* [Building regulations 2.01.01–82. Building Climatology and Geophysics]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1983. 57 p.
19. Gromov N.K., Shubin E.P. *Vodyanye teplovyie seti: spravochnoe posobie po proektirovaniyu* [Water heating networks: a reference book on designing]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 376 p.
20. Garcia A.L. *Numerical methods for physics*. San Jose CA, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015. 432 p.
21. Guva A.Ya. *Kratkiy teplofizicheskiy spravochnik* [Brief thermophysical reference book]. Novosibirsk, Sibvuzizdat Publ., 2002. 300 p.

Received: 13 November 2017.

Information about the authors

Viacheslav Yu. Polovnikov, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.