

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ СИСТЕМ ТРАНСПОРТИРОВКИ ТЕПЛА

Г.В. Кузнецов, В.Ю. Половников

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Важнейшее направление энергосбережения в области теплоснабжения в современных условиях – это сокращение технологических потерь при передаче тепловой энергии потребителям [1]. При этом одним из ключевых условий, без которого не может быть достигнут необходимый результат, является оптимизация эксплуатационных режимов функционирования тепловых сетей [1].

Рассматривается наиболее типичный вариант прокладки тепловых сетей в РФ – подземный непроходной невентилируемый железобетонный канал и два трубопровода (подающий и обратный), изолированные минеральной ватой и защитным покровным слоем (рис.). Для рассматриваемой области (рис.) решается двумерная сопряженная стационарная задача кондуктивно-конвективно-радиационного теплопереноса в системе «подземный каналный двухтрубный теплопровод – окружающая среда».

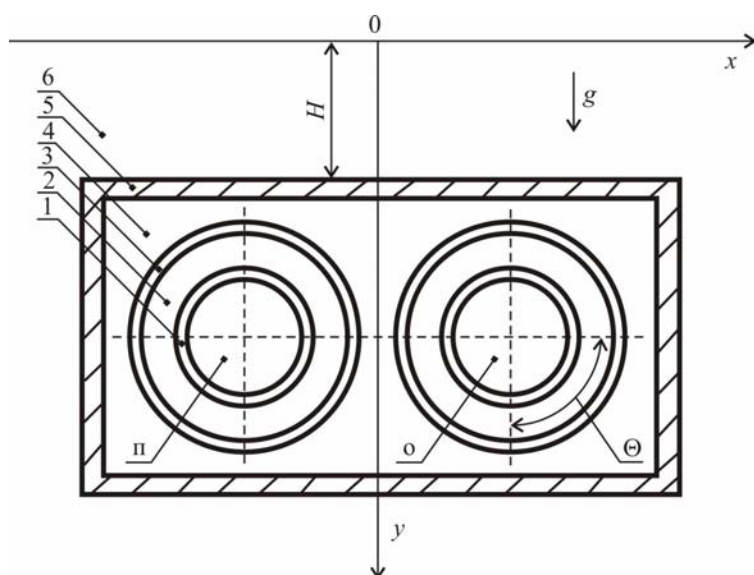


Рис. – Схема области решения:
1 – металлическая стенка трубы; 2 – слой тепловой изоляции; 3 – покровный слой; 4 – полость канала; 5 – железобетонная стенка канала; 6 – грунт; п – подающий трубопровод; о – обратный трубопровод.

При постановке задачи приняты следующие основные допущения:

1. Не рассматриваются процессы переноса тепла в теплоносителях и металлических стенках труб;
2. Влага, содержащаяся в воздухе каналного пространства, не проникает в теплозащитную конструкцию теплопровода;
3. Не учитывается наличие фазовых переходов;
4. Воздух, заполняющий полость канала (рис.), считается несжимаемым и удовлетворяющим приближению Буссинеска [2].

Принятые допущения, с одной стороны, не накладывают принципиальных ограничений на физическую модель рассматриваемой системы (рис.), а с другой – позволяют определенным образом упростить алгоритм и метод решения поставленной задачи.

В предлагаемой постановке процесс переноса тепла в рассматриваемой области решения (рис.) будет описываться следующими выражениями:

$$c\rho\left(w_x\frac{\partial T_4}{\partial x}+w_y\frac{\partial T_4}{\partial y}\right)=\lambda\left(\frac{\partial^2 T_4}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T_4}{\partial y^2}\right); \quad (1)$$

$$w_x\frac{\partial w_x}{\partial x}+w_y\frac{\partial w_x}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+\nu\left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2}\right); \quad (2)$$

$$w_x\frac{\partial w_y}{\partial x}+w_y\frac{\partial w_y}{\partial y}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}+\nu\left(\frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2}\right)+g\beta(T_4-T_7); \quad (3)$$

$$\frac{\partial w_x}{\partial x}+\frac{\partial w_y}{\partial y}=0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 T_{i,n}}{\partial x^2}+\frac{1}{x}\frac{\partial T_{i,n}}{\partial x}+\frac{1}{x^2}\frac{\partial^2 T_{i,n}}{\partial \Theta^2}=0, \quad i=2, 3; \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 T_{i,o}}{\partial x^2}+\frac{1}{x}\frac{\partial T_{i,o}}{\partial x}+\frac{1}{x^2}\frac{\partial^2 T_{i,o}}{\partial \Theta^2}=0, \quad i=2, 3; \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T_i}{\partial y^2}=0, \quad i=5, 6; \quad (7)$$

$$T_{2,n}=T_n=\text{const}; \quad (8)$$

$$T_{2,o}=T_o=\text{const}; \quad (9)$$

$$-\lambda_6\frac{\partial T_6}{\partial y}=\alpha(T_6-T_7); \quad (10)$$

$$\lambda_i\frac{\partial T_i}{\partial x}=\lambda_j\frac{\partial T_j}{\partial x}, \quad T_i=T_j, \quad i,j=4, 5, 6, \quad i\neq j; \quad (11)$$

$$\lambda_i\frac{\partial T_i}{\partial y}=\lambda_j\frac{\partial T_j}{\partial y}, \quad T_i=T_j, \quad i,j=4, 5, 6, \quad i\neq j; \quad (12)$$

$$\lambda_i\frac{\partial T_{i,n}}{\partial x}=\lambda_j\frac{\partial T_{j,n}}{\partial x}, \quad T_i=T_j, \quad i,j=2, 3, \quad i\neq j; \quad (13)$$

$$\lambda_i\frac{\partial T_{i,n}}{\partial y}=\lambda_j\frac{\partial T_{j,n}}{\partial y}, \quad T_i=T_j, \quad i,j=2, 3, \quad i\neq j; \quad (14)$$

$$\lambda_i\frac{\partial T_{i,o}}{\partial x}=\lambda_j\frac{\partial T_{j,o}}{\partial x}, \quad T_i=T_j, \quad i,j=2, 3, \quad i\neq j; \quad (15)$$

$$\lambda_i\frac{\partial T_{i,o}}{\partial y}=\lambda_j\frac{\partial T_{j,o}}{\partial y}, \quad T_i=T_j, \quad i,j=2, 3, \quad i\neq j; \quad (16)$$

$$\lambda_3\frac{\partial T_{3,n}}{\partial x}=\lambda_4\frac{\partial T_{4,n}}{\partial x}+\varepsilon_{\text{np}}\sigma(T_{4,n}^4-T_5^4), \quad T_{3,n}=T_{4,n}; \quad (17)$$

$$\lambda_3\frac{\partial T_{3,o}}{\partial x}=\lambda_4\frac{\partial T_{4,o}}{\partial x}+\varepsilon_{\text{np}}\sigma(T_{4,o}^4-T_5^4), \quad T_{3,o}=T_{4,o}; \quad (18)$$

$$\frac{\partial T_{i,n}}{\partial \Theta}=0, \quad i=2, 3; \quad (19)$$

$$\frac{\partial T_{i,o}}{\partial \Theta}=0, \quad i=2, 3; \quad (20)$$

$$\frac{\partial T_6}{\partial x}=0, \quad x\rightarrow\pm\infty; \quad (21)$$

$$\frac{\partial T_6}{\partial y} = 0, \quad y \rightarrow -\infty; \quad (22)$$

$$w_x = w_y = 0. \quad (23)$$

Задача (1)–(23) решена методом конечных элементов [3] с использованием аппроксимации Галеркина. Исследования проводились на неравномерной конечно-элементной сетке, имеющей 112993 узлов и состоящей из 19484 элементов. Воздушная полость канала (рис.) содержала 73898 узла и 16163 элемента.

Исследования проводились для трубопроводов с диаметрами условного прохода 600 мм, изолированных минеральной ватой (толщина 70 мм) [4]. Покровный слой – песчанно-цементная штукатурка по каркасу из металлической сетки толщиной 20 мм [4]. Рассматривался типичный для тепловых сетей РФ сборный железобетонный канал марки КЛс 210-210 [4] с толщиной стенок 135 мм. Полость канала занимал воздух с относительной влажностью 90 %. Расстояние от поверхности грунта до верхней части канала составляло $H = 1$ метр (рис.).

Температуры внутренних поверхностей слоев тепловой изоляции подающего и обратного трубопроводов принималась $T_{п}=363$ К и $T_{о}=323$ К и соответствовали среднегодовым температурам теплоносителя в подающих и обратных трубопроводах водяных тепловых сетей при их работе по одному из основных температурных графиков [5] – 150/70 °С. Температура окружающей среды во всех вариантах численного анализа принималась равной средней температуре воздуха за отопительный период в г. Томск [6] – $T_{г}=264,2$ К. Значение коэффициента теплоотдачи от грунта к окружающей среде составляло $\alpha=5$ Вт/(м²·К).

В таблице 1 приведены значения [7] теплофизических характеристик тепловой изоляции, покровного слоя, стенок канала и грунтов, использованные при проведении численных исследований тепловых потерь рассматриваемой системы (рис.).

Таблица 1

Теплофизические характеристики материалов [7]

Материал	Тепловая изоляция	Покровный слой	Стенка канала	Грунт				Суглинок с массовой влажностью 42 %
				Глинистый		Песчаный		
				Талый	Мерзлый	Талый	Мерзлый	
λ , Вт/(м·К)	0,059	0,87	1,54	1.1	1.3	2.3	3.7	1.5
c , Дж/(кг·К)	670	837	887	1231	959	1486	1005	1150
ρ , кг/м ³	206	1750	2200	1700	1700	2000	2000	1960
ε	–	0,8	0,85	–	–	–	–	–

В таблице 2 приведены величины тепловых потерь рассматриваемого теплопровода (рис.) с учетом Q_2 и без учета Q_1 теплового излучения. Так же в таблице 2 представлен расчет тепловых потерь $Q_{сп}$ с использованием действующих правил по проектированию тепловой защиты трубопроводов тепловых сетей [5] для конфигурации теплопровода соответствующей рассматриваемой системе (рис.).

Результаты расчета тепловых потерь, приведенные в таблице 2, свидетельствуют о том, что учет теплообмена излучением в полости канала теплопровода приводит к увеличению расчетных значений тепловых потерь на 3,60–4.18 % в зависимости от теплофизических характеристик грунта в зоне прокладки. Расхождение между результатами расчета Q_2 и $Q_{сп}$ составляет величину до 10.77 %, что подтверждает необходимость перехода к сопряженным

постановкам задач при проведении исследований тепловых режимов и тепловых потерь систем транспортировки тепла и возможность усовершенствования действующих правил [5] по проектированию тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей, проложенных канальным способом.

Таблица 2

Результаты расчета тепловых потерь рассматриваемой системы (рис.)

Грунт		Q_1 , Вт/м	Q_2 , Вт/м	$\frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} \cdot 100\%$	$\frac{Q_2 - Q_{\text{сп}}}{Q_2} \cdot 100\%$	$Q_{\text{сп}}$, Вт/м
Глинистый	Талый	158.90	165.84	4.18	10.77	147.98
	Мерзлый	168.12	175.30	4.09	9.82	158.09
Песчаный	Талый	195.69	203.44	3.81	7.13	188.94
	Мерзлый	213.36	221.34	3.60	5.57	209.01
Суглинок с массовой влажностью 42 %		175.64	183.01	4.03	9.06	166.42

Следует отметить, что наименьшее отклонение между результатами расчетов Q_2 и $Q_{\text{сп}}$ (таблица 2) соответствует прокладке теплопровода в мерзлых грунтах, что позволяет сделать вывод о том, что методика расчета [5] дает наиболее корректные значения тепловых потерь при прокладке тепловых сетей в грунтах, имеющих достаточно высокую теплопроводность (таблица 1).

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ (№ МК-1284.2011.8).

Обозначения: T – температура, К; x, y, Θ – координаты; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); c – теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м³; p – давление, Па; w_x, w_y – составляющие скорости в проекции на оси координат, м/с; ν – кинематическая вязкость, м²/с; g – ускорение силы тяжести, м/с²; β – коэффициент температурного расширения, К⁻¹; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); ε – степень черноты; $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана – Больцмана; 1–6 – номера областей расчета (рис.); 7 – окружающая среда; p, o – подающий и обратный трубопроводы соответственно, pr – приведенный.

Литература

1. Бытенский О.М. Энергосбережение в тепловых сетях систем теплоснабжения // Энергетик. 2009. № 5. С. 25–28.
2. Джалурия Й. Естественная конвекция: Тепло- и массообмен. М.: Мир, 1983. 400 с.
3. Самарский А. А., Гулин А. Н. Численные методы математической физики. М.: Научный мир, 2000. 316 с.
4. Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей. / Под ред. А. А. Николаева. Курган: Интеграл, 2010. 357 с.
5. СП 41-103-2000. Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. М.: Госстрой России, 2001. 42 с.
6. Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: Издательство МЭИ, 2001. 472 с.
7. Гува А.Я. Краткий теплофизический справочник. Новосибирск: Сибвузиздат, 2002. 300 с.