

УДК 621.643.001:536.2

Г. В. Кузнецов, В. Ю. Половников

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ТЕПЛОПРОВОДОВ С УЧЕТОМ КОНВЕКТИВНОГО ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУХА В ПОЛОСТИ КАНАЛА И ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ*

Разработан новый подход к анализу тепловых режимов систем транспортировки тепла на базе решения сопряженной задачи конвективно-радиационно-кондуктивного теплопереноса в системе подземный каналный теплопровод — окружающая среда. Показано, что применение предложенного подхода позволяет проводить всесторонний анализ тепловых режимов систем транспортировки тепла.

Ключевые слова: математическое моделирование, теплопровод, тепловые потери, тепловое излучение.

The new approach to the analysis of thermal modes of systems of transportation of heat on the basis of the decision of the interfaced problem convection, radiation and conduction heat transfer in system an underground channel heat conductor (environment) is developed. The application of the offered approach is allowed to carry out the all-round analysis of thermal modes of systems of transportation of heat.

Key words: mathematical modeling, heat pipeline, thermal loss, thermal radiation.

В соответствии с [1] среди основных стратегических целей развития сферы теплоснабжения — кардинальное повышение технического уровня систем теплоснабжения на основе инновационных высокоэффективных технологий и оборудования, а также сокращение непроизводительных потерь тепловой энергии и расходов топлива.

Одним из базовых элементов, без которых невозможно достижение поставленных целей, применительно к системам транспортировки тепла является разработка новых и усовершенствование действующих методик проектирования и способов анализа тепловых режимов и тепловых потерь систем передачи тепловой энергии.

В настоящее время проектирование и анализ тепловых режимов работы систем транспортировки тепла основаны на применении общих балансовых соотношений [2], не учитывающих разнородность и нестационарность процессов теплообмена, наличие фазовых переходов, изменение условий эксплуатации и взаимодействия теплопроводов с окружающей средой. Необходимость усовершенствования действующих правил по проектированию тепловой изоляции оборудования и трубопроводов [2] диктуется Энергетической стратегией, а также подтверждается проведенными ранее исследованиями [3]. В [3] подведены итоги исследования имеющихся подходов к анализу тепловых потерь и тепловых режимов систем транспортировки тепла, выявлены достоинства и недостатки всех методов и однозначно указано на необходимость разработки альтернативных подходов к анализу тепловых потерь рассматриваемых систем.

* Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 гг. (ГК № П1445 от 03.09.09) и при частичной поддержке РФФИ (грант № 08-08-00143-а).

Целью данной работы является численный анализ тепловых потерь канальных однетрубных теплопроводов с учетом теплового излучения и конвективного движения воздуха в полости канала.

Постановка задачи. Рассматривается одна из широко распространенных в РФ конфигураций теплопроводов подземной прокладки [4] — непроходной железобетонный канал и трубопровод, изолированный минеральной ватой и защитным покровным слоем (рис.).

Для рассматриваемой области решается двумерная сопряженная [5] стационарная нелинейная задача конвективно-радиационно-кондуктивного теплопереноса в системе слой тепловой изоляции — покровный слой — полость канала — стенка канала теплопровода — грунт — окружающая среда.

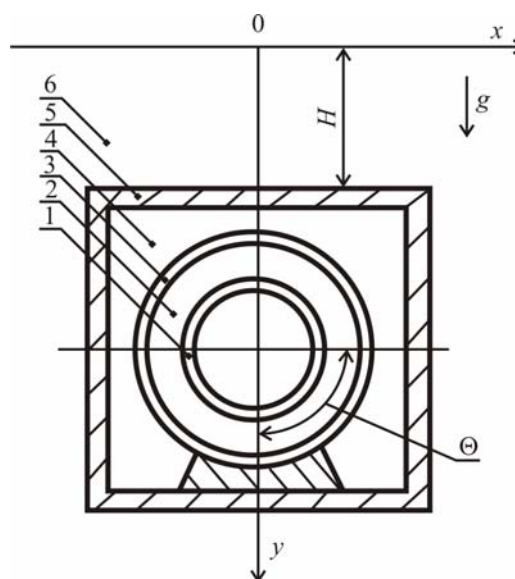


Схема области решения: 1 — металлическая стенка трубы; 2 — слой тепловой изоляции; 3 — покровный слой; 4 — полость канала; 5 — железобетонная стенка канала; 6 — грунт

В действующих правилах по расчетной оценке тепловых потерь [2] из рассмотрения исключаются радиационный и конвективный теплоперенос в полости канала, а коэффициенты теплоотдачи к поверхностям в канальном пространстве (см. рис.) принимаются по рекомендациям [2]. К тому же в соответствии с действующей методикой [2] термическое сопротивление грунта рассчитывается с использованием приближенного соотношения, представляющего собой зависимость между некоторыми константами, геометрическими характеристиками теплопровода и коэффициентом теплопроводности грунта. Подобный подход к оценке термического сопротивления грунта хорошо зарекомендовал себя в практических расчетах, однако он не вполне соответствует современным представлениям о процессах теплопереноса.

Реальная практика эксплуатации теплопроводов [6] показывает, что распределение температур в полости канала играет заметную роль в формировании теплового режима рассматриваемой системы. Соответственно для полного описания исследуемых процессов необходимо решать сопряженные задачи [5] для многосвязной области (см. рис.).

При постановке задачи приняты следующие основные допущения:

- 1) не рассматриваются процессы переноса тепла в теплоносителе и металлической стенке трубы;
- 2) влага, содержащаяся в воздухе канального пространства, не проникает в теплозащитную конструкцию теплопровода;
- 3) не учитывается наличие фазовых переходов;
- 4) воздух, заполняющий полость канала, считается несжимаемым и удовлетворяющим приближению Буссинеска [7].

Математическая модель. В предлагаемой постановке процесс переноса тепла в рассматриваемой области решения в двумерной постановке будет описываться:

для воздуха в полости канала уравнениями энергии, движения и неразрывности:

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

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

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

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

в тепловой изоляции и покровном слое уравнениями теплопроводности в цилиндрической системе координат:

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

в стенах канала и грунте уравнениями теплопроводности в декартовой системе координат:

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

При постановке задачи принималось, что на внутренней поверхности слоя тепловой изоляции поддерживается постоянная температура, равная температуре теплоносителя в трубе:

$$T_2 = \text{const}. \quad (7)$$

На границе раздела грунт — окружающая среда выполняются условия конвективного теплообмена:

$$-\lambda_6\frac{\partial T_6}{\partial y}=\alpha(T_6-T_7). \quad (8)$$

В местах соприкосновения слоев реализуются условия идеального теплового контакта:

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial x} = \lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial x}, \quad T_i = T_j, \quad i, j=2, 5, 6, i \neq j, \quad (9)$$

$$\lambda_i \frac{\partial T_i}{\partial y} = \lambda_j \frac{\partial T_j}{\partial y}, \quad T_i = T_j, \quad i, j=2, 3, \dots, 6, i \neq j. \quad (10)$$

На поверхности раздела покровный слой — полость канала учтено наличие теплообмена излучением:

$$\lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} = \lambda_4 \frac{\partial T_4}{\partial x} + \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \left[\left(\frac{T_4}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 \right], \quad T_3 = T_4. \quad (11)$$

Для тепловой изоляции и покровного слоя выполняются условия симметрии:

$$\frac{\partial T_i}{\partial \Theta} = 0, \quad i=2, 3. \quad (12)$$

На достаточно большом расстоянии от теплопровода (см. рис.) градиенты температур в грунте равны нулю:

$$\frac{\partial T_6}{\partial x} = 0, \quad x \rightarrow \pm\infty, \quad \frac{\partial T_6}{\partial y} = 0, \quad y \rightarrow -\infty. \quad (13)$$

Скорость движения воздуха, находящегося в полости канала, на внешней поверхности покровного слоя и внутренней поверхности стенок канала равна нулю (условия прилипания):

$$w_x = w_y = 0. \quad (14)$$

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); $\varepsilon_{\text{пр}}$ — приведенная степень черноты; $C_0=5,67$ Вт/(м²·К⁴) — коэффициент излучения абсолютно черного тела. *Индексы:* 1—6 — номера областей расчета (см. рис.); 7 — окружающая среда.

Метод решения и исходные данные. Рассматриваемая задача (1—14) решена методом конечных элементов [8] с использованием аппроксимации Галеркина [9, 10]. Исследования проводились на неравномерной конечно-элементной сетке, имеющей 30056 узлов и состоящей из 7880 элементов. Количество элементов выбиралось из условий сходимости решения, сгущение сетки проводилось методом Делоне [10].

Исследования проводились для трубопровода с диаметром условного прохода 600 мм, изолированного минеральной ватой (толщина 70 мм) [4]. Покровный слой — песчано-цементная штукатурка по каркасу из металлической сетки толщиной 20 мм [4]. Рассматривался типичный для тепловых се-

тей РФ сборный одноячейковый железобетонный канал марки КЛс120-120 [4] с толщиной стенок 135 мм. Полость канала занимал воздух с относительной влажностью 100 %. Расстояние от поверхности грунта до верхней части канала составляло $H = 1$ м (см. рис.). Температура внутренней поверхности слоя теплоизоляции составляла $T_2 = 363,15$ К и соответствовала среднегодовой температуре теплоносителя в подающих трубопроводах водяных тепловых сетей при их работе по одному из основных температурных графиков [2] — $150/70$ °С, а температура окружающей среды принималась равной средней температуре воздуха за отопительный период [11] — $T_7 = 269,95$ К (г. Москва). Коэффициент теплоотдачи от грунта к окружающей среде α варьировал в диапазоне 5—20 Вт/(м²·К).

В табл. 1 приведены значения [12, 13] теплофизических характеристик тепловой изоляции, кровного слоя, стенок канала и грунтов, использованные при проведении численных исследований тепловых потерь рассматриваемой системы.

Т а б л и ц а 1

Теплофизические характеристики материалов [12, 13]

Материал	Тепловая изоляция	Покровный слой	Стенка канала	Грунт			
				Глинистый		Песчаный	
				Талый	Мерзлый	Талый	Мерзлый
λ , Вт/(м·К)	0,059	0,87	1,54	1,1	1,3	2,3	3,7
c , Дж/(кг·К)	670	837	887	1231	959	1486	1005
ρ , кг/м ³	206	1750	2200	1700	1700	2000	2000
ε	—	0,805	0,85	—	—	—	—

Результаты численного моделирования. Основные результаты численного исследования тепловых потерь теплопровода приведены в табл. 2. 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 проведенной ранее проверкой [14] адекватности предложенного подхода к анализу тепловых режимов систем транспортировки тепла. Относительная погрешность расчетов тепловых потерь во всех вариантах численного анализа не превышала 0,6 %, что можно считать приемлемым при проведении исследований тепловых режимов систем транспортировки тепла.

В [14] приведено детализированное сравнение результатов численного моделирования тепловых режимов теплопроводов с использованием математической модели, аналогичной модели (1—14), с теоретическими и экспериментальными данными других авторов. В [14] показано, что сопоставление экспериментальных исследований [15] температурных полей в полости канала однотрубного теплопровода и данных, приведенных в теоретических работах [6, 16] по тепловым режимам теплопроводов, с результатами численного

анализа [14] свидетельствует об их хорошем качественном и удовлетворительном количественном соответствии. Следует подчеркнуть, что результаты исследований [14] показали целесообразность перехода к сопряженным [5] постановкам при анализе тепловых режимов теплопроводов.

В табл. 2 приведены величины тепловых потерь рассматриваемого теплопровода с учетом теплового излучения Q и без учета теплового излучения Q_1 . Также в табл. 2 представлены расчеты тепловых потерь Q_2 с использованием действующих правил по проектированию тепловой защиты трубопроводов тепловых сетей [2] для конфигурации теплопровода, соответствующего рассматриваемой системе.

Т а б л и ц а 2

Результаты численного исследования тепловых потерь теплопровода

Грунт		α , Вт/(м ² ·К)	Q , Вт/м	Q_1 , Вт/м	Q_2 , Вт/м
Глинистый	Талый	5	129,47	112,03	109,88
		10	131,25	113,80	
		15	131,90	114,44	
		20	132,22	114,74	
	Мерзлый	5	134,29	116,78	114,84
		10	136,32	118,75	
		15	136,99	119,37	
		20	137,34	119,67	
Песчаный	Талый	5	148,02	130,13	128,71
		10	150,35	132,40	
		15	151,17	133,21	
		20	151,75	133,62	
	Мерзлый	5	156,38	138,34	136,84
		10	158,64	140,59	
		15	159,12	140,72	
		20	160,00	141,97	

Результаты численных экспериментов, приведенные в табл. 2, позволяют сделать вывод об ожидаемом увеличении тепловых потерь Q , Q_1 и Q_2 при прокладке теплопроводов в песчаных грунтах, имеющих более высокие коэффициенты теплопроводности (см. табл. 1). Возрастание значений коэффициентов теплоотдачи α на границе раздела грунт — окружающая среда также приводит к соответствующему незначительному росту тепловых потерь. Так, при увеличении α во всех вариантах численных исследований в 4 раза тепловые потери рассматриваемой системы увеличивались не более чем на 2,5 %. Объясняется это тем, что для теплопровода, проложенного подземным способом, определяющим является теплоотвод в массив грунта, обладающего высокой тепловой инерцией. При этом, несмотря на то, что при постановке задачи предполагалось использование области неограниченных размеров (выражения (13)), при проведении численного анализа тепловых потерь 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 градиентов температур на границах области не превышало 0,5 %.

Анализ результатов численных исследований, представленных в табл. 2, дает возможность утверждать, что учет наличия лучистого теплообмена в полости канала теплопровода приводит к увеличению тепловых потерь Q рассматриваемого объекта на величину от 11,3 до 13,5 % по сравнению с Q_1 в зависимости от значений коэффициентов теплоотдачи на границе с окружающей средой и характеристик грунтов в зоне прокладки. С ростом теплопроводности грунта (см. табл. 1) наблюдается снижение вклада радиационной составляющей в общем балансе тепловых потерь (см. табл. 2) вследствие снижения перепада температур в полости канала (выражение (11)).

Сопоставление результатов численного анализа тепловых потерь теплопровода с учетом радиационного теплообмена Q с результатами расчетов Q_2 , произведенных по нормативной методике [2], свидетельствует о том, что расхождение в результатах (см. табл. 2) составляет от 12,5 до 16,9 %, что позволяет сделать вывод о целесообразности учета теплового излучения при проведении исследований тепловых режимов и тепловых потерь систем транспортировки тепла и необходимости учета этого фактора в действующих правилах по проектированию тепловой изоляции трубопроводов [2].

Заключение. Методом конечных элементов решена сопряженная задача конвективно-радиационно-кондуктивного теплопереноса в системе подземный канальный однетрубный теплопровод — окружающая среда.

Установлено, что радиационный теплообмен в воздушной полости подземных канальных однетрубных теплопроводов оказывает заметное влияние на их тепловые потери и должен учитываться при проектировании тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Развитие теплоснабжения в России в соответствии с Энергетической стратегией до 2030 г. // Новости теплоснабжения. 2010. № 2. С. 6—9.
2. СП 41-103—2000. Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. М. : Госстрой России, 2001. 42 с.
3. Шишкин А. В. Определение потерь тепла в сетях централизованного теплоснабжения // Теплоэнергетика. 2003. № 9. С. 68—74.
4. Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей / под ред. А. А. Николаева. Курган : Интеграл, 2010. 357 с.
5. Лыков А. В. Тепломассообмен : справочник. М. : Энергия, 1978. 479 с.
6. Иванов В. В., Шкребко С. В. Исследование и качественное прогнозирование состояния участков тепловых сетей // Труды V Росс. национальной конф. по теплообмену «Теплопроводность, теплоизоляция». М. : Издат. дом МЭИ, 2010. Т. 7. С. 110—113.
7. Джалурия Й. Естественная конвекция : тепло- и массообмен. М. : Мир, 1983. 400 с.
8. Самарский А. А., Гулин А. Н. Численные методы математической физики. М. : Научный мир, 2000. 316 с.
9. Митчел Э., Уэйт Р. Метод конечных элементов для уравнений с частными производными. М. : Мир, 1981. 216 с.
10. Шайдулов В. В. Многосеточные методы конечных элементов. М. : Наука, 1989. 288 с.
11. Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети. М. : Изд-во МЭИ, 2001. 472 с.
12. Гува А. Я. Краткий теплофизический справочник. Новосибирск : Сибвузиздат, 2002. 300 с.
13. Излучательные свойства твердых материалов. Справочник / под ред. А. Е. Шейншлина. М. : Энергия, 1974. 472 с.
14. Половников В. Ю. Анализ тепловых режимов однетрубных теплопроводов с учетом конвективного движения воздуха в полости канала // Известия Томского политехнического университета. 2010. Т. 317. № 4. С. 33—38.

15. Витальев В. П. Исследование режимов высыхания изоляции подземных теплопроводов // Наладочные и экспериментальные работы ОРГРЭС. М. ; Л. : Госэнергоиздат, 1955. Вып. 11. С. 36—49.

16. Иванов В. В., Василенко В. В., Черныш С. В. К оценке тепловых потерь подземных теплотрасс // Известия вузов. Строительство. 2000. № 1. С. 66—69.

1. Razvitie teplosnabzheniya v Rossii v sootvetstvii s Energeticheskoy strategiyey do 2030 g. // Novosti teplosnabzheniya. 2010. № 2. S. 6—9.

2. SP 41-103—2000. Proektirovanie teplovoy izolyatsii oborudovaniya i truboprovodov. M. : Gosstroi Rossii, 2001. 42 s.

3. Shishkin A. V. Opredelenie poter tepla v setyakh tsentralizovannogo teplosnabzheniya // Teploenergetika. 2003. № 9. S. 68—74.

4. Spravochnik proektirovshchika. Proektirovanie teplovykh setei / pod red. A. A. Nikolaeva. Kurgan : Integral, 2010. 357 s.

5. Lykov A. V. Teplomassoobmen : spravochnik. M. : Energiya, 1978. 479 s.

6. Ivanov V. V., Shkrebko S. V. Issledovanie i kachestvennoe prognozirovanie sostoyaniya uchastkov teplovykh setei // Trudy V Ross. natsionalnoy konf. po teploobmenu «Teploprovodnost, teploizolyatsiya». M. : Izd. dom MEI, 2010. T. 7. S. 110—113.

7. Dzhaliyeva I. Estestvennaya konvektsiya: teplo- i massoobmen. M. : Mir, 1983. 400 s.

8. Samarski A. A., Gulin A. N. Chislennyye metody matematicheskoy fiziki. M. : Nauchny mir, 2000. 316 s.

9. Mitchel E., Ueit R. Metod konechnykh elementov dlya uravneni s chastnymi proizvodnymi. M. : Mir, 1981. 216 s.

10. Shaidurov V. V. Mnogosetochnyye metody konechnykh elementov. M. : Nauka, 1989. 288 s.

11. Sokolov Ye. Ya. Teplofikatsiya i teplovyye seti. M. : Izd-vo MEI, 2001. 472 s.

12. Guva A. Ya. Kratkiy teplofizicheskiy spravochnik. Novosibirsk : Sibvuzizdat, 2002. 300 s.

13. Izluchatelnyye svoystva tverdykh materialov. Spravochnik / pod red. A. Ye. Sheindlina. M. : Energiya, 1974. 472 s.

14. Polovnikov V. Yu. Analiz teplovykh rezhimov odnotrubnykh teploprovodov s uchetoм konvektivnogo dvizheniya vozduha v polosti kanala // Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. 2010. T. 317. № 4. S. 33—38.

15. Vitalev V. P. Issledovanie rezhimov vysyhaniya izolyatsii podzemnykh teploprovodov // Naladochnyye i eksperimentalnyye raboty ORGRES. M. ; L. : Gosenergoizdat, 1955. Vyp. 11. S. 36—49.

16. Ivanov V. V., Vasilenko V. V., Chernysh S. V. K otsenke teplovykh poter podzemnykh teplotrass // Izvestiya vuzov. Stroitelstvo. 2000. № 1. S. 66—69.

© Кузнецов Г.В., Половников В.Ю., 2011

Поступила в редакцию
в сентябре 2011 г.

Ссылка для цитирования:

Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. Численный анализ тепловых потерь теплопроводов с учетом конвективного движения воздуха в полости канала и теплового излучения // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Строит. информатика. 2011. Вып. 6(18). Режим доступа: www.vestnik.vgasu.ru.