

19.11.2003 р.).

Запропоновані ІТТФ НАНУ наукова ідеологія і політики комплексної модернізації комунальної теплоенергетики України на базі відповідних регіональних програм представлені у ряді публікацій [3-7].

#### ЛІТЕРАТУРА

1. *Басаргин В.Ф.* Перспективы развития отрасли ЖКХ // *Новости теплоснабжения.* – 2010. – №12. – С. 8-11.

2. *Долінский А.А., Черняк В.П., Сигал А.И., Базеев Е.Т.* К основным положениям концепции развития малой энергетики Украины // *Промышленная теплотехника.* – 1993. – №4. – С. 88-91.

3. *Долінский А.А., Басок Б.І., Базеев Є.Т., Піроженко І.А. (редакційна колегія)* / Комунальна теплоенергетика України: стан, проблеми, шляхи модернізації, у 2-ох томах. Київ. – 2007. –

828 с.

4. *Долінский А.А., Басок Б.І., Чайка О.І., Базеев Є.Т.* Концепція (проект) Державної науково-технічної програми «Комплексна модернізація комунальної теплоенергетики» // *Вісник НАН України.* – 2007. – №7. – С. 22-27.

5. *Долінский А.А., Басок Б.І., Кучин Г.П., Базеев Є. Т. та ін.* Програми технічної модернізації комунальної теплоенергетики регіонів України // *Пром. теплотехника* – 2009. – Т. 31. – №1. – С. 5-14.

6. *Долінский А.А., Басок Б.І., Базеев Є.Т., Кучин Г.П.* Основні положення концепції Національної стратегії теплозабезпечення населених пунктів України // *Пром. теплотехника.* – 2009. – Т.31. – №4. – С. 8-77.

7. *Долінский А.А., Басок Б.І., Базеев Є.Т.* Державна цільова програма (проект) модернізації комунальної теплоенергетики на 2010 – 2014 роки // *Вісник НАН України.* – 2009. – №10. – С. 3-8.

*Получено 02.04.2012 г.*

УДК 621.643.001:536.2

**Кузнецов Г.В., Половников В.Ю.**

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет*

### ОЦЕНКА МАСШТАБОВ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ПОДЗЕМНЫХ КАНАЛЬНЫХ ТЕПЛОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ ДЕФОРМАЦИИ СЛОЯ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Встановлено масштаби теплових втрат підземних каналних теплопроводів в умовах деформації шару теплової ізоляції. Показана перспективність застосування розробленої моделі та методики чисельного аналізу для оцінки масштабів теплових втрат теплопроводів, що працюють з деформованою тепловою ізоляцією.

Установлены масштабы тепловых потерь подземных каналных теплопроводов в условиях деформации слоя тепловой изоляции. Показана перспективность применения разработанной модели и методики численного анализа для оценки масштабов тепловых потерь теплопроводов, работающих с деформированной тепловой изоляцией.

Set the scale of the heat loss of underground channel of heat pipelines strain in the layer of thermal insulation. The prospects of application of the model and numerical analysis techniques to assess the extent of heat loss of heat pipelines, working with a deformed thermal insulation.

$C$  – теплоемкость;

$F$  – массовые силы;

$G$  – ускорение силы тяжести;

$T$  – температура;

$Q$  – линейные тепловые потери;

$p$  – давление;

$w$  – скорость;

$x$  – координата;

$y$  – координата;  
 $Gr$  – число Грасгофа;  
 $Pr$  – число Прандтля;  
 $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  
 $\beta$  – коэффициент температурного расширения;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  
 $\nu$  – кинематическая вязкость;  
 $\rho$  – плотность;  
 ВВП – валовой внутренний продукт.

#### Индексы нижние:

1 – внутренняя поверхность трубы;  
 2 – граница раздела «стенка трубы – изоляция»;  
 3 – граница раздела «стенка трубы – воздушная прослойка»;  
 4 – граница раздела «воздушная прослойка – изоляция»;

5 – граница раздела «изоляция – стенка канала»;  
 6 – граница раздела «стенка канала – грунт»;  
 7 – граница раздела «грунт – окружающая среда»;  
 $a$  – полость канала;  
 $ai$  – воздушная прослойка;  
 $d$  – деформирован;  
 $dn$  – не деформирован;  
 $c$  – стенка канала;  
 $ef$  – эффективный  
 $ex$  – внешний;  
 $g$  – грунт;  
 $i$  – слой тепловой изоляции;  
 $in$  – внутренний;  
 $p$  – стенка трубы;  
 $r$  – рассчитан по утвержденным правилам.

#### Введение

Россия входит в десятку «лидеров» по энергозатратности, а по потерям в тепловых сетях занимает первое место в мире [1]. Энергоемкость российской экономики нельзя оправдать ни объемами ВВП или темпами его роста, ни особенностями географо-климатических условий [1].

Вопросу определения фактических потерь тепла в тепловых сетях уделяется достаточно пристальное внимание уже несколько десятилетий [2]. Из-за отсутствия возможности [2] учета и аналитического описания множества факторов, влияющих на процессы износа теплопроводов, однозначного ответа на этот вопрос до сих пор нет.

Основными причинами роста тепловых потерь теплопроводов являются увлажнение [3], деформация и нарушения целостности слоя тепловой изоляции [4]. Масштабы потерь тепла теплотрубопроводов, эксплуатирующихся с увлажненной изоляцией, и факторы, оказывающие основное влияние на интенсификацию тепловых потерь в подобных условиях установлены и приведены в [5]. Однако до настоящего времени не опубликовано результатов каких-либо теоретических или экспериментальных исследований тепловых

режимов и тепловых потерь систем транспортировки тепла, работающих с частично разрушенной или деформированной тепловой изоляцией.

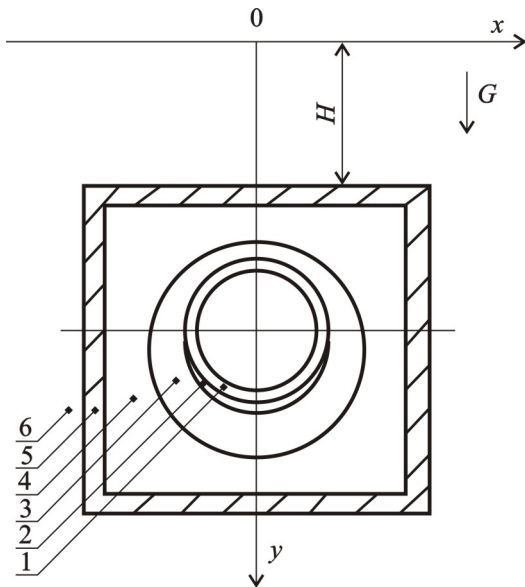
Целью данной работы является численное моделирование тепловых режимов и оценка масштабов тепловых потерь подземных канальных теплопроводов в условиях деформации слоя тепловой изоляции.

#### Постановка задачи

Рассматривается широко распространенная в России конфигурация теплопровода [6], размещенного в непроходном канале и теплоизолированного минеральной ватой. Схематическое изображение области решения приведено на рисунке.

Деформация изоляции теплопровода имитировалась путем снижения толщины слоя тепловой изоляции в верхней части и провисанием (с образованием воздушной прослойки) теплоизоляции в нижней части теплопровода. Подобное состояние теплоизоляционной конструкции теплопроводов является достаточно распространенным и отражает реальную геометрию изоляции теплопроводов тепловых сетей [7].

Для рассматриваемой области (рис.) решается двумерная сопряженная стационарная



**Рис. Схема области решения задачи:**  
**1 – стенка трубы; 2 – воздушная прослойка;**  
**3 – слой деформированной тепловой**  
**изоляции; 4 – воздушная полость канала;**  
**5 – железобетонная стенка**  
**канала; 6 – грунт.**

задача кондуктивно-конвективного теплопереноса [8] в системе «подземный каналный теплопровод с деформированной изоляцией – окружающая среда». Целесообразность перехода к сопряженным постановкам задач [8] при прогностическом моделировании тепловых режимов работы теплопроводов описана в [9]. В [9] показаны обоснованность предложенного перехода, существенное влияние распределений температур в полости канала на формирование теплового режима рассматриваемых систем и необходимость учета этого фактора при проектировании и анализе работы тепловых сетей.

Следует отметить, что решение нестационарной задачи теплопереноса для рассматриваемой системы (рис.) 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.

При постановке задачи приняты следующие основные допущения:

1. Теплофизические характеристики материалов, используемые при численном анализе, являются постоянными и известными величинами.

2. Воздух, заполняющий полость канала (рис.) является сухим, несжимаемым и удовлетворяющим приближению Буссинеска [10].

3. В воздушной прослойке, образовавшейся в результате деформации слоя тепловой изоляции, расчет теплопередачи производится с использованием эффективного коэффициента теплопроводности [11], учитывающего интенсификацию теплообмена, вызываемую свободной конвекцией.

4. Не учитывается наличие радиационного теплообмена.

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.

#### *Математическая модель*

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

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

$$C_a \rho_a (\vec{w}, \nabla T_a) = \lambda_a \nabla^2 T_a, \quad (1)$$

$$(\vec{w}, \nabla) \vec{w} = -\frac{1}{\rho_a} \nabla p + \nu_a \nabla^2 \vec{w} + \vec{F}, \quad (2)$$

$$\nabla \vec{w} = 0; \quad (3)$$

- в стенке трубы, слое тепловой изоляции, воздушной прослойке, стенах канала и грунте уравнениями теплопроводности:

$$\nabla^2 T_p = 0, \quad (4)$$

$$\nabla^2 T_i = 0, \quad (5)$$

$$\nabla^2 T_{ai} = 0, \quad (6)$$

$$\nabla^2 T_c = 0, \quad (7)$$

$$\nabla^2 T_g = 0. \quad (8)$$

При постановке задачи принималось, что на внутренней поверхности трубы поддерживается постоянная температура, равная температуре теплоносителя:

$$T_{p,1} = T_{in} = \text{const.} \quad (9)$$

На границах слоев реализуются условия идеального теплового контакта:

$$\lambda_p \text{grad}(T_{p,2}) = \lambda_i \text{grad}(T_{i,2}), \quad T_{p,2} = T_{i,2}, \quad (10)$$

$$\lambda_p \text{grad}(T_{p,3}) = \lambda_{ef} \text{grad}(T_{ai,3}), \quad T_{p,3} = T_{ai,3}, \quad (11)$$

$$\lambda_{ef} \text{grad}(T_{ai,4}) = \lambda_i \text{grad}(T_{i,4}), \quad T_{ai,4} = T_{i,4}, \quad (12)$$

$$\lambda_i \text{grad}(T_{i,5}) = \lambda_a \text{grad}(T_{a,5}), \quad T_{i,5} = T_{a,5}, \quad (13)$$

$$\lambda_a \text{grad}(T_{a,6}) = \lambda_g \text{grad}(T_{g,6}), \quad T_{a,6} = T_{g,6}. \quad (14)$$

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

$$-\lambda_g \text{grad}(T_{g,7}) = \alpha(T_{g,7} - T_{ex}). \quad (15)$$

Для стенки трубы, воздушной прослойки и слоя тепловой изоляции выполняются условия симметрии:

$$\text{grad}(T_p) = 0, \quad (16)$$

$$\text{grad}(T_{ai}) = 0, \quad (17)$$

$$\text{grad}(T_i) = 0. \quad (18)$$

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

$$\text{grad}(T_g) = 0, \quad x \rightarrow \pm \infty, \quad y \rightarrow -\infty. \quad (19)$$

Скорость движения воздуха на внешней поверхности теплопровода, а также на внутренней поверхности стенок канала (рис.) равна нулю (условия прилипания):

$$w_{a,5} = w_{a,6} = 0. \quad (20)$$

Эффективный коэффициент теплопроводности воздушной прослойки вычислялся из соотношения [11]:

$$\lambda_{ef} = 0,18\lambda_a (\text{GrPr})^{0,25}. \quad (21)$$

Массовые силы  $F$  в выражении (2) рассчитывались из выражений:

$$F_x = 0; \quad (22)$$

$$F_y = G \cdot \beta \cdot (T_{a,5} - T_{a,6}). \quad (23)$$

### Метод решения и исходные данные

Задача (1) – (23) решена методом конечных элементов [12] с использованием аппроксимации Галеркина. Исследования проводились на неравномерной конечно-элементной сетке, состоящей из 15492 элементов. Воздушная полость канала (рис.) содержала 4640 элементов. Количество элементов выбиралось из условий сходимости решения, сгущение сетки проводилось методом Делоне [13].

Исследования проводились для трубопровода с диаметром условного прохода 600 мм, изготовленного из стали 10 (толщина стенки 9 мм), тепловая изоляция – минеральная вата (толщина 70 мм) [6]. Теплопровод размещался в канале марки КЛс 120-120 [6]. Температура внутренней поверхности трубы считалась равной  $T_{in} = 338; 363; 383$  К и соответствовала среднегодовой температуре теплоносителя в подающих трубопроводах водяных тепловых сетей при их работе по основным температурным графикам [14] – 95/70; 150/70; 180/70 °С. Температура окружающей среды во всех вариантах численного анализа принималась равной средней температуре воздуха за отопительный период в городе Томск [14] –  $T_{ex} = 264,2$  К. Средний коэффициент теплоотдачи на поверхности раздела «грунт – окружающая среда» составлял  $\alpha = 5$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Несмотря на то, что при постановке задачи предполагалось использование области неограниченных размеров (выражение (19)), при проведении численного моделирования использовалась расчетная область размерами 6 м в глубину и по 5 м в стороны от оси симметрии. Размеры расчетной области выбирались на основании серии предварительных численных экспериментов таким образом, чтобы относительное изменение температур на границах области решения не превышало 0,5 %.

Наличие деформации изоляции теплотру-

бопровода учитывалась снижением толщины слоя в верхней части и провисанием теплоизоляции в нижней части теплопровода на величину, равную полутолщине изоляции (35 мм). Размер воздушной прослойки соответствовали размеру слоя тепловой изоляции, на который была уменьшена толщина теплоизоляции в верхней части конструкции.

В табл. 1 приведены значения [15] теплофизических характеристик, использованные при проведении численных исследований тепловых потерь рассматриваемой системы (рис.).

Табл. 1. Теплофизические характеристики материалов [15]

Характеристика	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$C$ , Дж/(кг·К)	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>
Грунт	1,1	1231	1700
Стенка канала	1,54	887	2200
Тепловая изоляция	0,059	670	206
Воздух	0,027	1005	1,165
Стенка трубы	57,7	466	7860

### Результаты численного моделирования

Результаты численного исследования тепловых потерь теплопроводов в условиях деформации слоя тепловой изоляции 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 [9] адекват-

ности предложенного подхода к анализу тепловых режимов теплопроводов. Относительная погрешность расчетов тепловых потерь во всех вариантах численного анализа не превышала 0,5 %, что можно считать приемлемым при проведении исследований тепловых режимов теплопроводов.

В табл. 2 приведены величины тепловых потерь теплопровода, имеющего деформированную  $Q_d$  и не деформированную  $Q_{dn}$  тепловую изоляцию, а также тепловые потери  $Q_r$  рассматриваемого объекта (рис.), рассчитанные с использованием действующих правил по проектированию тепловой изоляции трубопроводов [14].

Результаты численного моделирования, приведенные в табл. 2, свидетельствуют о закономерном увеличении тепловых потерь теплопровода с ростом температуры внутренней поверхности трубы  $T_{in}$ . Сопоставление результатов численного анализа тепловых потерь теплопровода с не деформированной тепловой изоляцией  $Q_{dn}$  с тепловыми потерями  $Q_r$  вычисленными по методике [14] позволяет говорить о том, что расхождение между ними не превышает 3 %, что в целом подтверждает адекватность предлагаемой в данной работе математической модели и методики анализа тепловых потерь теплопроводов.

Сравнение  $Q_d$  с  $Q_{dn}$  (табл. 2) позволяет сделать вывод о том, что относительно небольшое изменение геометрических характеристик теплоизоляционной конструкции рассматриваемой системы (рис.) приводит к увеличению тепловых потерь рассматриваемого теплопровода на 7,3...7,5 %. Принимая во внимание то обстоятельство, что рассматриваемые условия работы теплопроводов являются

Табл. 2. Результаты численного исследования тепловых потерь теплопровода

$T_{in}$ , К	$Q_r$ , Вт/м	$Q_{dn}$ , Вт/м	$Q_d$ , Вт/м	$\frac{Q_r - Q_{dn}}{Q_r} \cdot 100\%$	$\frac{Q_d - Q_{dn}}{Q_d} \cdot 100\%$
338	87,8	85,2	92,1	2,96	7,49
363	117,5	114,7	124,0	2,38	7,50
383	141,3	138,4	149,3	2,05	7,30

достаточно распространенными [7], а протяженность тепловых сетей в крупных городах и промышленных центрах составляет десятки, а иногда и сотни километров [5], то суммарные потери тепла, связанные с деформацией тепловой изоляции, могут достигать существенных величин.

Анализ температурных полей в зоне прокладки теплопровода и структуры течения воздуха в полости канала (рис.) свидетельствует о том, что распределение изотермических линий в рассматриваемой области решения качественно согласуется с результатами численного моделирования [9], а наличие деформации тепловой изоляции теплопровода не вносит заметных изменений в структуру течения и поле скоростей в полости канала [9].

### Заключение

Проведен численный анализ влияния деформации слоя тепловой изоляции на тепловые режимы и тепловые потери подземных канальных теплопроводов.

Установлено, что в рамках предложенной модели, тепловые потери теплопровода в условиях деформации слоя тепловой изоляции возрастают на 7,3...7,5 %.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о перспективности применения разработанной модели и методики численного анализа для оценки масштабов тепловых потерь теплопроводов, работающих с деформированной тепловой изоляцией.

*Работа выполнена в рамках гранта Президента РФ (проект № МК-1284.2011.8).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ушаков В.Я. Повышение энергоэффективности экономики России: планы и действия // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 314. – № 4. С. 52 – 56.
2. Шишкин А.В. Определение потерь тепла в сетях централизованного теплоснабжения // Теплоэнергетика. – 2003. – № 9. – С. 68 – 74.
3. Яковлев Б.В. Предотвращение коррозионной повреждаемости теплосетей канальной

прокладки // Новости теплоснабжения. – 2009. – № 3. – С. 39 – 41.

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

5. Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. Численное моделирование теплового состояния трубопровода в условиях затопления с учетом нестационарности процесса насыщения теплоизоляции влагой // Теплоэнергетика. – 2008. – №5. – С. 60 – 64.

6. Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей / под ред. А.А. Николаева. – Курган: Интеграл, 2010. – 357 с.

7. Шойхет Б.М., Ставрицкая Л.В. Обследование технического состояния и реконструкция тепловой изоляции эксплуатируемых магистральных теплопроводов // Энергосбережение. – 2002. – № 3. – С. 60 – 62.

8. Лыков А.В., Алексащенко А.А., Алексащенко В.А. Сопряженные задачи конвективного теплообмена. Минск: Наука и техника, 1971. – 346 с.

9. Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. Новый подход к анализу тепловых режимов систем транспортировки тепла // Энергосбережение и водоподготовка. – 2011. – №2. С. 64 – 67.

10. Джалурия Й. Естественная конвекция: Тепло- и массообмен. – М.: Мир, 1983. – 400 с.

11. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – М.: Атомиздат, 1979. – 415 с.

12. Самарский А.А., Гулин А.Н. Численные методы математической физики. М.: Научный мир, 2000. – 316 с.

13. Шайдуров В.В. Многосеточные методы конечных элементов. М.: Наука, 1989. – 288 с.

14. СП 41-103-2000. Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. – М.: Госстрой России, 2001. – 42 с.

15. Гува А.Я. Краткий теплофизический справочник. Новосибирск: Сибвузиздат, 2002. – 300 с.

*Получено 03.02.2012 г.*