

УДК 621.643.001:536.2

## **Численный анализ влияния испарения и диффузии влаги на тепловые потери теплопроводов, работающих в условиях увлажнения изоляции**

**В.Ю. Половников\*, Е.В. Губина**  
*Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет  
Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 30*

Received 07.02.2014, received in revised form 21.03.2014, accepted 09.06.2014

---

*Приведены результаты численного моделирования тепловых режимов теплопроводов в условиях увлажнения изоляции с учетом испарения и диффузии влаги. Выявлены масштабы тепловых потерь теплопроводов в условиях увлажнения изоляции с учетом испарения и диффузии влаги. Показан вклад эффекта испарения в суммарные тепловые потери и необходимость учета объемных долей влаги и пара в структуре слоя тепловой изоляции при расчете ее эффективной теплопроводности. Установлено, что нестационарностью процессов тепломассопереноса в условиях рассматриваемой задачи можно пренебречь.*

*Ключевые слова: тепловые потери, теплопровод, тепловая изоляция, испарение, диффузия.*

---

### **Введение**

Известно, что 40 % тепловых сетей России требуют ремонта, 15 % – находятся в аварийном состоянии, а тепловые потери в сетях превышают 16 % годового расхода топлива на теплоснабжение [1]. При этом одним из главных факторов, приводящих к сверхнормативным тепловым потерям, является эксплуатация теплопроводов в условиях увлажнения изоляции [2–4].

В настоящее время выполнен анализ механизмов влагопереноса в увлажненной изоляции теплопроводов [2], проведены исследования нестационарности процессов тепломассопереноса в увлажненной изоляции [3] и экспериментальное определение [4] тепловых потерь теплопроводов в условиях затопления каналов тепловых сетей. При этом в [2–4] не учитывается влияние фазовых переходов в структуре пористого слоя тепловой изоляции на интенсификацию тепловых потерь рассматриваемых объектов.

Целью данной работы является математическое моделирование тепловых режимов и численный анализ тепловых потерь теплопроводов в условиях увлажнения тепловой изоляции с учетом испарения влаги на границе раздела «стенка трубы – слой изоляции» и диффузии образовавшегося пара к внешней поверхности изоляционного слоя.

---

© Siberian Federal University. All rights reserved

\* Corresponding author E-mail address: polov@tpu.ru

### Постановка задачи

Рассматривается широко распространенная в настоящее время конфигурация теплопровода [5], уложенного в одноячейковый подземный железобетонный канал. Предполагается, что теплопровод эксплуатируется в условиях затопления канала тепловой сети, что соответствует максимальному увлажнению изоляции [3]. Начальные значения температур и влажности в рассматриваемой области решения (рис. 1) имеют постоянные значения. В момент времени, отличный от нуля, на внутренней поверхности трубы  $R_1$  (рис. 1) устанавливается температура, равная температуре теплоносителя, а на границе раздела «стенка трубы – слой тепловой изоляции»  $R_2$  начинается испарение влаги. Образующийся пар диффундирует через слой увлажненной изоляции в направлении к внешней поверхности  $R_3$ . Следствием наличия в пористой структуре тепловой изоляции влаги и пара является изменение эффективной теплопроводности теплоизоляционного слоя, а наличие потока массы на внешней поверхности теплоизоляции приводит к изменению механизмов тепломассообмена теплопровода с внешней средой.

С учетом рассматриваемых факторов анализ тепловых потерь сводится к совместному решению нестационарной нелинейной задачи теплопроводности для двухслойного полого цилиндра «стенка трубы – слой увлажненной теплоизоляции» и задачи диффузии пара в слое увлажненной изоляции. Для задачи теплопроводности на внутренней поверхности трубы  $R_1$  выставляется граничное условие первого рода, а на внешней поверхности изоляции  $R_3$  – граничные условия третьего рода (рис. 1). На границе раздела  $R_2$  «стенка трубы – слой увлажненной изоляции» учтено наличие испарения влаги. Для задачи диффузии на границе  $R_2$  задается плотность потока массы, а на границе  $R_3$  – условия массообмена рассматриваемой системы (рис. 1) с окружающей средой.

Задача решалась с учетом следующих основных допущений:

1. На границе раздела «стенка трубы – слой увлажненной изоляции» выполняются условия идеального теплового контакта.
2. Теплофизические характеристики материалов и веществ являются постоянными и известными величинами. Диапазон изменения параметров, влияющих на теплофизические характеристики, в рассматриваемой задаче невелик [6], а следовательно, изменением свойств можно пренебречь.

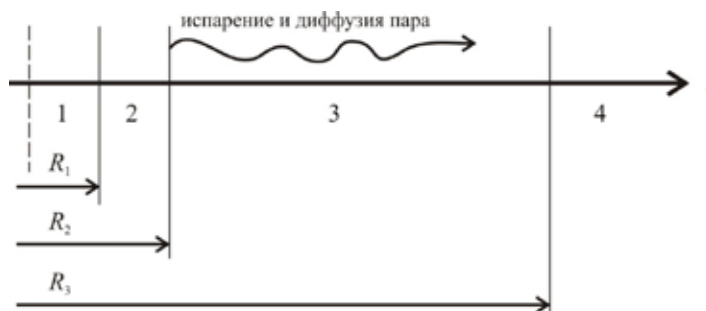


Рис. 1. Схематическое изображение области решения: 1 – теплоноситель; 2 – стенка трубы; 3 – слой изоляции; 4 – окружающая среда

3. Потери тепла не влияют на температуру внутренней поверхности изоляции. Считается, что теплоноситель в трубе интенсивно перемешивается и движется со скоростью, достаточной для поддержания постоянной температуры в рассматриваемом сечении.
4. Не рассматривается теплоперенос во внешней среде и теплоносителя в трубе (рис. 1).
5. Теплота в стенке трубы и слое изоляции передается только теплопроводностью (рис. 1).

Принятые допущения не накладывают принципиальных ограничений на общность постановки задачи и отражают достаточно реальный режим работы теплопровода в условиях увлажнения изоляции.

### Математическая модель

Задача решена в цилиндрической системе координат, начало которой связано с осью симметрии трубы. Математическая постановка задачи имеет вид

$$\tau \geq 0, R_1 \leq r < R_2; \quad c_2 \rho_2 \frac{\partial T_2}{\partial \tau} = \lambda_2 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2}{\partial r} \right); \quad (1)$$

$$\tau \geq 0, R_2 < r \leq R_3; \quad c_{ef}(\tau, r) \rho_{ef}(\tau, r) \frac{\partial T_3}{\partial \tau} = \lambda_{ef}(\tau, r) \left( \frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3}{\partial r} \right); \quad (2)$$

$$\tau = 0, R_1 \leq r \leq R_3; \quad T_2 = T_3 = T_0 = \text{const}; \quad (3)$$

$$\tau \geq 0, r = R_1; \quad T_2 = T_{in} = \text{const}; \quad (4)$$

$$\tau \geq 0, r = R_2; \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \lambda_{ef} \frac{\partial T_3}{\partial r} - jQ; \quad T_2 = T_3; \quad (5)$$

$$\tau \geq 0, r = R_3; \quad -\lambda_{ef}(\tau, R_3) \frac{\partial T_3}{\partial r} = \alpha(T_3 - T_{ex}); \quad (6)$$

$$\tau \geq 0, R_2 \leq r < R_3; \quad \frac{\partial C_{st}}{\partial \tau} = D_3 \left( \frac{\partial^2 C_{st}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_{st}}{\partial r} \right); \quad (7)$$

$$\tau = 0, R_2 \leq r \leq R_3; \quad C_{st} = C_0 = \text{const}; \quad (8)$$

$$\tau \geq 0, r = R_2; \quad -D_3 \rho_{ef}(\tau, R_2) \frac{\partial C_{st}}{\partial r} = j; \quad (9)$$

$$\tau \geq 0, r = R_3; \quad -D_3 \frac{\partial C_{st}}{\partial r} = \beta(C_{st} - C_{ex}). \quad (10)$$

Обозначения:  $T$  – температура, К;  $\tau$  – время, с;  $r$  – координата, м;  $R$  – граница области расчета, м;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $c$  – теплоемкость, Дж/(кг·К);  $Q$  – теплота фазового перехода, Дж/кг;  $j$  – плотность потока массы, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $C$  – относительная объемная концентрация;  $\beta$  – коэффициент массоотдачи, м/с.

Индексы: 1, 2, 3 – номера границ областей расчета; 0 – начальный момент времени;  $ef$  – эффективный;  $in$  – внутренний;  $ex$  – наружный;  $st$  – пар.

Плотность потока массы при испарении влаги определялась из соотношения [7]

$$j = \frac{a(P_s - P_p)}{\sqrt{\frac{2\pi R_g}{M} T(\tau, R_2)}}, \quad (11)$$

где  $a$  – коэффициент аккомодации;  $P_s$  – давление насыщения, Па;  $P_p$  – парциальное давление испаряющейся компоненты, Па;  $R_g$  – газовая постоянная, Дж/(кмоль·К);  $M$  – молекулярная масса паров, кг/моль.

Коэффициент аккомодации вычислялся по формуле [8]

$$a = \frac{0.059}{P_s^{0.5}}.$$

Парциальное давление испаряющейся компоненты в выражении (11) вычислялось методом Риделя–Планка–Миллера [9]. Теплоту парообразования находили по формуле [10]

$$Q = 2500.64 - 2.369T(\tau, R_2).$$

Теплофизические свойства слоя тепловой изоляции определялись с учетом объемных долей каждой компоненты [11]. Например, эффективный коэффициент теплопроводности вычисляется из соотношения

$$\lambda_{ef} = \lambda_3 C_3 + \lambda_w C_w + \lambda_{st} C_{st}$$

при условии, что  $C_3 + C_w + C_{st} = 1$ ;  $C_w + C_{st} = f$ ,

где  $f$  – открытая пористость,  $C_w$  – относительная объемная концентрация воды.

Коэффициент массоотдачи  $\beta$  определялся на основании метода единого описания конвективного теплопереноса из выражения [12]

$$\beta = \frac{\alpha}{c_{st} \rho_{st}}.$$

### Метод решения и исходные данные

Задача (1)–(10) решена методом конечных разностей [13] с использованием неявной четырехточечной разностной схемы. Разностные аналоги исходной системы уравнений решены методами «прогонки» и итераций [13]. Особенность решения задачи (1)–(10) состояла в разрыве значений теплофизических свойств на границе раздела «стенка трубы – слой увлажненной изоляции» и наличии нелинейного члена в граничном условии (5).

Численный анализ проводился для трубы с диаметром условного прохода 600 мм, изготовленной из стали 10 (толщина 9 мм) и тепловой изоляции из минеральной ваты (толщина 70 мм). Значение температуры в рассматриваемой области решения в начальный момент времени принималось равным  $T_0=298$  К. Температура внутренней поверхности трубы принималась равной  $T_{in}=338; 363; 383$  К и соответствовала среднегодовым температурам теплоносителей в подающих трубопроводах тепловых сетей [14]. Температура окружающей трубопровод среды составляла  $T_{ex}=298$  К. Коэффициент теплоотдачи от поверхности изоляции к внешней среде на

Таблица 1. Характеристики минеральной ваты

Характеристика	$\lambda_3$ , Вт/(м·К)	$c_3$ , кДж/(кг·К)	$\rho_3$ , кг/м <sup>3</sup>	$D_3$ , м <sup>2</sup> /с	$f$
Значение	0.059	0.67	206	$4.5 \cdot 10^{-7}$	0.73

основании проведенных ранее исследований [3] принимался равным  $\alpha = 11$  Вт/(м<sup>2</sup>·К). Начальные относительные объемные концентрации воды и пара в пористой структуре слоя тепловой изоляции принимались равными  $C_w=f$  и  $C_{st}=0$ , а относительная объемная концентрация пара в окружающей среде –  $C_{ex}=0$ .

В табл. 1 приведены физические характеристики [6, 15] слоя тепловой изоляции в сухом состоянии, использовавшиеся при проведении численного моделирования.

### Результаты исследования

Основные результаты численного моделирования тепловых режимов теплопроводов в условиях увлажнения изоляции с учетом испарения и диффузии влаги приведены в табл. 2 и на рис. 2.

При проведении численных исследований основное внимание уделялось анализу масштабности влияния эффектов испарения воды на внутренней поверхности трубы и диффузии образующегося при этом пара на интенсивность отвода теплоты в окружающую среду.

Обоснованность и достоверность результатов исследований следует из приведенных проверок используемых методов на сходимость и устойчивость решений на множестве сеток при выполнении условий баланса энергии на границах области расчета. Погрешность по балансу энергии во всех вариантах численного анализа не превышала 0,5 %, что можно считать приемлемым при моделировании тепловых режимов теплопроводов в условиях увлажнения изоляции [2, 3].

В табл. 2 представлены численные значения тепловых потерь рассматриваемой системы (рис. 1) в условиях, когда изоляция не увлажнена  $Q_{dry}$ ; изоляция увлажнена  $Q_{wet}$ ; изоляция увлажнена и учитывается испарение влаги на поверхности трубы  $Q_{ev}$ ; изоляция увлажнена,

Таблица 2. Результаты численного моделирования

Характеристика	$T_{ins}$ , К	$Q_{dry}$ , Вт/м	$Q_{wet}$ , Вт/м	$Q_{ev}$ , Вт/м	$Q_{dif}$ , Вт/м	$C_{st}^{max}$	$\frac{Q_{wet} - Q_{dry}}{Q_{wet}} 100\%$	$\frac{Q_{ev} - Q_{wet}}{Q_{ev}} 100\%$	$\frac{Q_{ev} - Q_{dif}}{Q_{ev}} 100\%$	$\frac{Q_{dif} - Q_{dry}}{Q_{dif}} 100\%$
Значение	338	68.1	387.0	430.6	414.4	0.0506	82.4	10.1	3.7	83.6
	363	110.7	639.4	845.3	794.5	0.0935	82.7	24.3	6.0	86.1
	383	144.7	842.6	1309.1	1202.5	0.1112	82.8	35.6	8.1	88.0

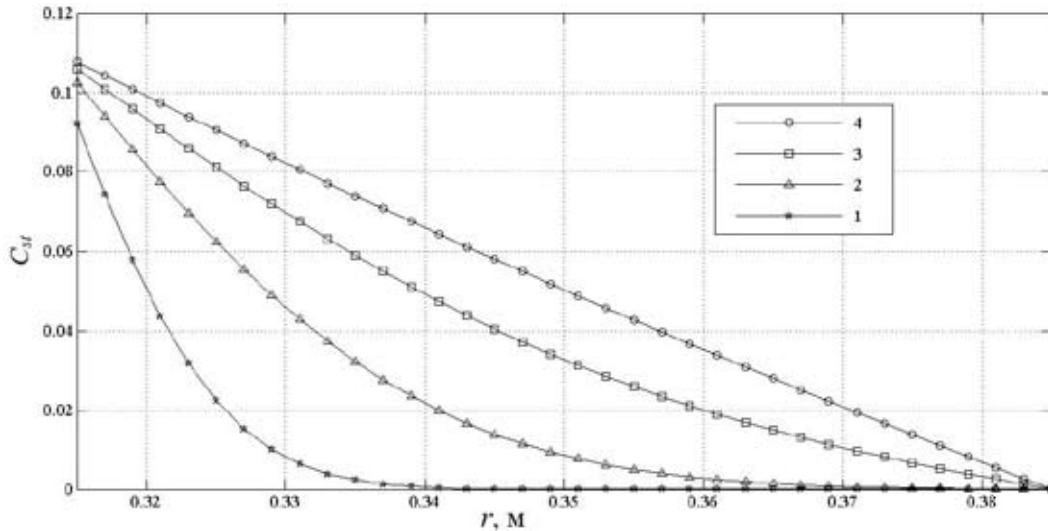


Рис. 2. Распределения относительных объемных концентраций пара по толщине слоя изоляции: 1 –  $0,1 \cdot 10^3$  с.; 2 –  $0,5 \cdot 10^3$  с.; 3 –  $1,5 \cdot 10^3$  с.; 4 –  $5 \cdot 10^3$  с

учитывается испарение и диффузия пара  $Q_{dif}$ , а также сопоставление этих величин между собой.

Результаты численного моделирования, приведенные в табл. 2, свидетельствуют об ожидаемом росте тепловых потерь теплопровода с увеличением температуры внутренней поверхности  $T_{in}$ .

Данные табл. 2 позволяют сделать следующие выводы:

- тепловые потери теплопроводов в условиях увлажнения изоляции без учета эффекта испарения ( $Q_{wet}$ ) возрастают на величину около 80 % по сравнению с тепловыми потерями теплопровода, имеющего сухую изоляцию ( $Q_{dry}$ ) при рассматриваемых в данной работе значениях определяющих параметров (температура, толщина и вид тепловой изоляции);
- вклад эффекта испарения влаги на поверхности трубы (рис. 1) в тепловые потери теплопроводов, работающих в условиях увлажнения изоляции, составляет от 10,1 до 35,6 %, что свидетельствует о необходимости учета наличия испарения при проведении численного анализа тепловых режимов теплопроводов, работающих с увлажненной изоляцией.

Учет наличия паровой компоненты в структуре увлажненного слоя тепловой изоляции теплопроводов приводит к снижению эффективной теплопроводности (из-за сравнительно невысоких теплофизических характеристик водяного пара [6]) и, соответственно, к уменьшению общего уровня тепловых потерь. Понижение уровня тепловых потерь составляет до 8,1 % (табл. 2).

Снижение уровня тепловых потерь теплопроводов в условиях увлажнения изоляции с учетом диффузии испаряющейся компоненты ограничено значениями  $C_{st}$ . Максимальные значения относительной объемной концентрации пара в пористой структуре слоя тепловой

изоляции  $C_{st}^{max}$  приведены табл. 2. Значения  $C_{st}$  сравнительно невелики, однако позволяют заметно уточнить масштабы тепловых потерь теплопроводов в условиях увлажнения изоляции.

На рис. 2 в качестве примера изображены распределения относительных объемных концентраций пара по толщине слоя изоляции в различные моменты времени при  $T_{in}=383$  К.

Анализ нестационарности процессов теплопереноса для рассматриваемой задачи свидетельствует о том, что время выхода на стационарный режим составляет  $2 \cdot 10^4$  с, а для задачи диффузии –  $5 \cdot 10^3$  с, что хорошо согласуется с результатами исследований [3].

Результаты численного анализа, приведенные на рис. 2, говорят о том, что выход процесса диффузии пара на стационарный режим произойдет сравнительно быстро, в течение 1,5 ч, что объясняется достаточно высоким значением коэффициента диффузии минеральной ваты (табл. 1). Из анализа рис. 2 видно, что процесс диффузии пара в увлажненной тепловой изоляции теплопроводов является нестационарным, а сопоставление результатов моделирования (рис. 2) с известными данными по диффузии воды и пара в промышленной изоляции [16] свидетельствует об их хорошем качественном согласовании.

Анализ результатов численного моделирования (рис. 2) позволяет сделать вывод о том, что в рамках рассматриваемой задачи нестационарными процессами теплопереноса вследствие их малой продолжительности можно пренебречь.

### Заключение

На базе совместного решения задач теплопроводности и диффузии проведены моделирование тепловых режимов и анализ тепловых потерь теплопроводов в условиях увлажнения изоляции.

Установлено, что в рассматриваемых условиях тепловые потери теплопровода увеличиваются на 83,6–88,0 %.

Показано, что нестационарностью процессов теплопереноса в увлажненной тепловой изоляции теплопроводов можно обоснованно пренебречь.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-08-00201-а и гранта Президента РФ № МК-1652.2013.8.

### Список литературы

- [1] Фахразиев И.З. Зацаринная Ю.Н. // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 20. С. 350–352.
- [2] Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. // Энергосбережение и водоподготовка. 2007. № 6. С. 37–39.
- [3] Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. // Теплоэнергетика. 2008. № 5. С. 60–64.
- [4] Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. // Промышленная энергетика. 2010. № 7. С. 43–45.
- [5] Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей / ред. А.А. Николаев. Курган: Интеграл, 2010. 357 с.
- [6] Гува А.А. Краткий теплофизический справочник. Новосибирск: Сибвузиздат, 2002. 300 с.
- [7] Полежаев Ю. В., Юревич Ф. Б. Тепловая защита. М.: Энергия, 1976. 392 с.

- [8] Санду С.Ф. Известия Томского политехнического университета. 2003. Т. 306. № 4. С. 60–63.
- [9] Reid R.C., Prausnitz J.M., Poling B.E. The properties of gases and liquids. New York, 1987. 753 pp.
- [10] Бурцев С.И., Цветков Ю.Н. Влажный воздух. Состав и свойства. СПб.: СПбГАХПТ, 1998. 146 с.
- [11] Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М.-Л.: Физматгиз, 1962. 456 с.
- [12] Цветков Ф.Ф. Тепломассообмен. М.: Изд-во МЭИ, 2005. 549 с.
- [13] Самарский А.А., Гулин А.Н. Численные методы математической физики. М.: Научный мир, 2000. 316 с.
- [14] СП 41-103-2000. Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. М.: Госстрой России, 2001. 42 с.
- [15] Васильев Л.Л., Танаева С.А. Теплофизические свойства пористых материалов. Минск: Наука и техника, 1971. 268 с.
- [16] Петров-Денисов В.Г., Масленников Л.А. Процессы тепло- и влагообмена в промышленной изоляции. М.: Энергоатомиздат, 1983. 193 с.

## **Numerical Analysis of Evaporation and Moisture Diffusion Effect on heat Losses of heat Pipeline in Conditions of Isolation Moistening**

**Vyacheslav Yu. Polovnikov and Ekaterina V. Gubina**  
*National Research Tomsk Polytechnic University  
30 Lenin, Tomsk, 634050, Russia*

---

*Results of numerical simulation of thermal regimes of heat pipeline in conditions of evaporation and moisture diffusion in moistening isolation were completed. Values of heat losses of heat pipelines insulation in conditions of evaporation and moisture diffusion in moistening isolation were established. Contribution of evaporation effect to total heat losses and need to consider volume fractions of water and steam into the structure of thermal insulation in calculation of effective thermal conductivity were shown. Nonstationarity of heat and mass transfer in conditions of considered problem can be ignored.*

*Keywords: heat losses, heat pipeline, thermal insulation, evaporation, diffusion.*

---