

УДК 621.643.001:536.2

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЛАГОПЕРЕНОСА В ТЕПЛОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ

Г.В. Кузнецов, В.Ю. Половников

*Томский политехнический университет, Томск, Россия
634050, Россия, Томск, пр. Ленина 30
E-mail: polov@tpu.ru*

Введение

На территории РФ проложено более 250 тыс. км. тепловых сетей. При этом наиболее распространена прокладка теплотрубопроводов в подземных железобетонных каналах, а основной тип применяемых теплоизоляционных материалов для канальных прокладок – изделия из минеральной ваты [1].

Величина тепловых потерь при транспортировке теплоносителя является важным показателем, характеризующим работу тепловых сетей. В настоящее время основной причиной роста тепловых потерь трубопроводов является [1, 2] изменение термовлажностных условий работы теплосетей и в первую очередь – эксплуатация теплопроводов, имеющих влагонасыщенную теплоизоляцию.

В структуру теплоизоляционного материала влага может проникать следующими способами:

1. При непосредственном контакте теплопровода с водой. Подобный режим работы теплопроводов реализуется при затоплении каналов тепловых сетей.
2. В результате конденсации на поверхности теплотрубопровода влаги, содержащейся в воздухе канального пространства. Анализ современного состояния тепловых сетей [2] свидетельствует о том, что такой режим работы является наиболее типичным внештатным режимом работы канальных теплотрубопроводов.

Целью данной работы является математическое моделирование тепловлагоденоса в тепловой изоляции трубопровода канальной прокладки, а также численный анализ тепловых потерь и продолжительности процесса насыщения влагой пористой структуры теплоизоляционного материала при непосредственном контакте теплопровода с водой (затопление теплотрассы) и конденсации паров воды на внешней поверхности теплотрубопровода.

Постановка задачи

Рассматриваются два варианта постановки задачи:

1. «Фильтрационная модель» – решаются одномерные задачи теплопроводности и молярного влагопереноса для слоя изоляции теплотрубопровода канальной прокладки.
2. «Диффузионная модель» – решаются одномерные задачи теплопроводности и молекулярного переноса влаги для тепловой изоляции трубопровода, проложенного канальным способом.

При решении задачи теплопроводности на внутренней границе рассматриваемой системы выставлялись граничные условия первого рода, а на внешней – граничные условия третьего рода. При этом в «фильтрационной модели» окружающей средой являлась вода, а в «диффузионной модели» – влажный воздух. При реализации задач

массопереноса в пористой теплоизоляции трубопровода на внешней поверхности слоя теплоизолятора вводились граничные условия первого рода. При этом считалось, что объемная доля влаги на внешней границе области решения численно равна открытой пористости теплоизоляционного материала.

Задача решена с учетом следующих основных допущений:

1. Теплофизические характеристики материалов и веществ, используемые при численном анализе, являются постоянными и известными величинами. Диапазон изменения параметров, влияющих на теплофизические характеристики, в рассматриваемых задачах не велик, а, следовательно, изменением свойств можно обоснованно пренебречь.
2. 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.
3. Не рассматриваются процессы конденсации и испарения паров воды в слое влагонасыщенной изоляции.

Математические модели

Задачи решались в цилиндрической системе координат, начало которой связано с осью симметрии трубы. Математическая постановка задачи для «фильтрационной модели» представлена уравнением теплопроводности (1) с соответствующими ему начальным (2) и граничными (3, 4) условиями. Процесс фильтрации влаги описан при помощи закона линейной фильтрации Дарси (8) и уравнения неразрывности (5) для жидкости, заполняющей пористый слой теплоизоляции.

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda(\tau, r) \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right); \quad \tau \geq 0, \quad R_1 \leq r \leq R_2; \quad (1)$$

$$\tau = 0, R_1 \leq r \leq R_2, \quad T = T_0 = const; \quad (2)$$

$$\tau > 0, r = R_1, \quad T = T_1 = const; \quad (3)$$

$$\tau > 0, r = R_2, \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha [T - T_{\text{окр}}]. \quad (4)$$

$$\tau \geq 0, \quad R_1 \leq r \leq R_2;$$

$$\frac{\partial \varphi_{\text{ж}}}{\partial \tau} + \frac{\partial (U \varphi_{\text{ж}})}{\partial r} + \frac{U}{r} \varphi_{\text{ж}} = 0; \quad (5)$$

$$\rho_{\text{ж}} = const;$$

$$\tau = 0, R_1 \leq r \leq R_2, \quad \varphi_{\text{ж}} = 0; \quad (6)$$

$$\tau > 0, r = R_2, \quad \varphi_{\text{ж}} = f. \quad (7)$$

$$U = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial r}, \quad R_1 \leq r \leq R_2; \quad (8)$$

$$r = R_2, \quad P = P_2. \quad (9)$$

Пористость f , объемные доли влаги $\varphi_{\text{в}}$ и воздуха $\varphi_{\text{а}}$ связаны между собой соотношением:

$$\varphi_{\text{ж}} + \varphi_{\text{г}} = f .$$

Обозначения: T – температура, К; τ – время, с; r – текущий радиус, м; c – теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м³; λ – теплопроводность, Вт/(м·К); R – граница области решения, м; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); φ – объемная доля компоненты; U – скорость фильтрации, м/с; f – открытая пористость; k – проницаемость, м²; μ – вязкость, Па·с; P – давление, Па.

Индексы: 0 – начальный момент времени; 1, 2 – соответственно внутренняя и внешняя поверхность изоляции; ж – жидкость, г – газ, окр – окружающая среда.

Теплофизические свойства тепловой изоляции при насыщении ее влагой рассчитывались как эффективные с учетом объемных долей каждой компоненты. При этом во внимание принималось то, что максимально возможное содержание влаги $\varphi_{\text{в}}$ в слое теплоизоляции ограничено значением открытой пористости материала (таб.1). Так, например, эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{эф}}$ рассчитывался из выражения [3]:

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_{\text{тв}} \varphi_{\text{тв}} + \lambda_{\text{ж}} \varphi_{\text{ж}} + \lambda_{\text{г}} \varphi_{\text{г}} , \quad (10)$$

здесь: тв – твердый каркас изоляции.

«Диффузионная модель» представлена уравнением и условиями (1)–(4), а также уравнением диффузии (11) с соответствующими ему краевыми условиями (12)–(14). Эффективные характеристики тепловой изоляции в этом случае рассчитывались по формулам, вид которых аналогичен выражению (10).

$$\frac{\partial C_{\text{ж}}}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 C_{\text{ж}}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_{\text{ж}}}{\partial r} \right); \quad \tau \geq 0, \quad R_1 \leq r \leq R_2; \quad (11)$$

$$\tau = 0, R_1 \leq r \leq R_2, \quad C_{\text{ж}} = 0; \quad (12)$$

$$\tau > 0, r = R_1, \quad \frac{\partial C_{\text{ж}}}{\partial r} = 0; \quad (13)$$

$$\tau > 0, r = R_2, \quad C_{\text{ж}} = C_2, \quad (14)$$

здесь: $C_{\text{ж}}$ – объемная концентрация; D – коэффициент диффузии, м²/с.

Метод решения и исходные данные

Система уравнений (1)–(14) решена методом конечных разностей [4]. Уравнения (1), (11) решены с использованием неявной четырехточечной разностной схемы, а

уравнение (5) с помощью схемы «неявный уголок». Разностные аналоги уравнений (1)–(14) разрешены методом «прогонки».

Анализ проводился для широко распространенной конфигурации теплопровода [1], что позволяет распространить результаты численных исследований на значительную часть тепловых сетей, работающих во внештатных условиях. Исследования проводились для теплопровода с диаметром условного прохода 600 мм и тепловой изоляцией из минеральной ваты (толщина 70 мм). Значение температуры в рассматриваемой области решения в начальный момент времени принималось равным $T_0=282\text{ K}$, а температура окружающей теплопровод среды (влажный воздух, вода), в соответствии с оценками [5], составляла $T_{\text{окр}}=282\text{ K}$.

При моделировании работы теплотрубопровода предполагалось, что на его внешнем контуре теплообмен осуществляется в условиях естественной конвекции. Коэффициенты теплоотдачи α для режимов естественной конвекции определялись по критериальным уравнениям, предложенным в [6].

Перепады давлений ΔP , необходимые для расчета скоростей фильтрации, задавались параметрически и соответствовали давлениям слоя воды над изоляцией теплопровода (например, разности давлений $\Delta P=50\text{ Па}$ соответствует слой воды толщиной 5 мм).

В таблице 1 приведены некоторые основные характеристики минеральной ваты: теплопроводность и открытая пористость [7], проницаемость [8] и коэффициент диффузии [9].

Таблица 1. Характеристики минеральной ваты.

Характеристика	λ , Вт/(м·К)	f	k , м ²	D , м ² /с
Значение	0.059	0.73	$2\cdot 5\cdot 10^{-11}$	$1\cdot 7\cdot 10^{-7}$

Результаты исследований

При проведении численных исследований основное внимание уделялось анализу характеристик нестационарного процесса насыщения изоляции влагой. Анализ проводился для периода времени, соответствующего выходу процесса на стационарный режим.

Обоснованность и достоверность результатов исследований следует из проведенных проверок используемых методов на сходимость и устойчивость решений на множестве сеток и выполнения условий баланса энергии и массы на границах области расчета. Погрешность по балансу энергии и массы во всех вариантах численного анализа не превысила 0.5%, что можно считать приемлемым при моделировании тепломассопереноса в изоляции теплопроводов.

В результате численного моделирования температурных полей во влагонасыщенной тепловой изоляции теплопровода, проведенных на базе математических моделей (1)–(14) было установлено, что тепловые потери (таб.2) теплопровода в условиях максимального влагонасыщения теплоизоляции существенно превышают нормированную величину теплопотерь [10]. При этом главным фактором, влияющим на рост тепловых потерь при эксплуатации теплопроводов, имеющих

влажноссыщенную тепловую изоляцию, является увеличение эффективной теплопроводности изоляции при насыщении ее влагой.

В таблице 2 представлены результаты численного анализа масштабов тепловых потерь теплопровода канальной прокладки, проведенного на основании математических моделей (1)–(14).

Из данных, приведенных в таблице 2 видно, что теплотери теплопровода канальной прокладки в 9.5 раз превышают нормативные показатели. При этом несколько больший уровень тепловых потерь при работе теплотрубопроводов в условиях затопления каналов теплосетей объясняется тем, что коэффициенты теплоотдачи естественной конвекции воды соответствующим образом превышают значения коэффициентов теплоотдачи естественной конвекции влажного воздуха.

Таблица 2. Тепловые потери трубопровода в условиях максимального влагонасыщения тепловой изоляции.

Вариант численного эксперимента	Тепловые потери, Вт/м	Отклонение от СНиП 41-03-2003 [10], ед
СНиП 41-03-2003 [10]	114	–
«Фильтрационная модель»	1088.9	9.5
«Диффузионная модель»	1031.8	9.05

Анализ результатов численного исследования тепловых потерь теплотрубопроводов канальной прокладки (таб.2) позволяет говорить о том, что эксплуатация теплопроводов в условиях реализующих «диффузионную модель» влагопереноса может привести к последствиям аналогичным эксплуатации трубопроводов в условиях затопления каналов тепловых сетей.

Результаты численного исследования нестационарности процессов насыщения изоляции влагой представлены в таблицах 3–5.

В таблицах 3, 4 приведены характерные времена насыщения изоляции влагой до предельного значения, полученные на основании «фильтрационной модели» влагопереноса в изоляции теплотрубопровода, в зависимости от перепадов давлений и значений коэффициентов проницаемости минеральной ваты.

Таблица 3. Характерные времена насыщения теплоизоляции влагой до максимального значения при разности давлений $\Delta P=50$ Па в зависимости от значений проницаемости.

$k, 10^{-11} \text{ м}^2$	2	3	4	5
$\tau, \text{ с}$	$8 \cdot 10^3$	$5.5 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^3$	$3.5 \cdot 10^3$

В результате исследования характеристик процесса насыщения изоляции влагой, проведенных на базе «фильтрационной модели», было установлено, что длительность этого процесса при работе трубопровода в условиях затопления каналов тепловых сетей зависит от разности давлений (толщины слоя воды над поверхностью теплопровод) и коэффициента проницаемости теплоизоляции.

Таблица 4. Характерные времена насыщения теплоизоляции влагой до максимального значения в зависимости от разности давлений при средней проницаемости $k = 3.5 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$.

$\Delta P, \text{ Па}$	1	10	50	100
$\tau, \text{ с}$	$15 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^3$	$2.5 \cdot 10^3$

Из данных таблиц 3, 4 видно, что длительность процесса влагонасыщения тепловой изоляции в условиях затопления каналов теплотрасс, тем больше, чем меньше разность давлений и проницаемость теплоизоляционного материала. В зависимости от варьируемых параметров, продолжительность влагонасыщения изоляции до максимального значения составляет величину от 40 минут до 42 часов.

В таблице 5 представлены результаты исследований длительности процесса влагонасыщения изоляции, проведенные на базе «диффузионной модели».

Таблица 5. Характерные времена насыщения теплоизоляции влагой до максимального значения в зависимости от значения коэффициента диффузии минеральной ваты.

$D, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	1	3	5	7
$\tau, \text{ с}$	$17 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	$3.5 \cdot 10^4$

Анализ результатов численного исследования длительности влагонасыщения изоляции с использованием «диффузионной модели» влагопереноса позволил сделать вывод о том, что основной характеристикой, влияющей на продолжительность влагонасыщения, является значение коэффициента диффузии теплоизоляционного материала. Результаты исследований, приведенные в таблице 5, свидетельствуют о том, что длительность процесса полного влагонасыщения при реализации диффузионного механизма переноса влаги, в зависимости от значений коэффициента диффузии, изменяется от 9 до 47 часов.

Результаты численных исследований приведенных в таблицах 3–5 позволяют говорить о том, что при достаточно низких коэффициентах проницаемости и диффузии и малых перепадах давлений, оценку продолжительности процесса насыщения изоляции влагой можно проводить с использованием как «фильтрационной», так и «диффузионной» моделей рассматриваемой системы. При наличии же относительно высоких перепадов давлений и коэффициентов проницаемости теплоизоляционного материала при анализе продолжительности влагонасыщения необходимо использовать только «фильтрационную модель».

Заключение

Разработаны математические модели тепловлагопереноса в тепловой изоляции трубопроводов канальной прокладки и методики численного анализа величины тепловых потерь и продолжительности процессов насыщения теплоизоляции влагой в условиях непосредственного контакта теплотрубопровода с водой и конденсации паров воды на внешнем контуре теплопровода.

Установлено, что тепловые потери теплотрубопроводов в условиях увлажнения теплоизоляции значительно превышают нормативные значения (до 9.5 раз), а

конденсация влаги на поверхности изоляции трубопровода может привести к последствиям аналогичным затоплению каналов тепловых сетей.

Выявлено, что процесс влагонасыщения носит нестационарный характер, а его продолжительность составляет величину от 40 минут до 47 часов в зависимости от реализуемого механизма влагопереноса и свойств теплоизоляции.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о перспективности применения разработанных моделей и методик численного анализа для оценки масштабов тепловых потерь и длительности процессов влагонасыщения тепловой изоляции трубопроводов канальной прокладки, работающих в условиях увлажнения изоляции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Администрации Томской области (грант № 05-02-98006 конкурс р_обь_а «Математическое моделирование процессов теплопереноса в объектах теплоснабжения с учетом взаимодействия с окружающей средой»).

Литература

- [1] Байбаков С.А., Тимошкин А.С. Основные направления повышения эффективности тепловых сетей // Электрические станции. – 2004. – №7. – С. 19 – 25.
- [2] Извеков А.В., Коновальцев С.И., Данилов О.Л., Новиков А.В., Альбертинский Л.И. Потери тепла в вентилируемых каналах тепловых сетей // Теплоэнергетика. – 1994. – №12. – С. 37 – 42.
- [3] Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. – М.: Изд. Физматгиз, 1962. – 456 с.
- [4] Самарский А.А. Теория разностных схем. - М.: Наука, 1977. – 656 с.
- [5] Соколов Е. Я. Теплофикация и тепловые сети. – М.: Изд. МЭИ, 1999. – 472 с.
- [6] Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.
- [7] Васильев Л. Л., Танаева С. А. Теплофизические свойства пористых материалов. – Минск: Наука и техника, 1971. – 268 с.
- [8] Коллинз Р. Течения жидкостей через пористые материалы. М.: Мир, 1964. – 352 с.
- [9] Петров-Денисов В. Г., Масленников Л. А. Процессы тепло- и влагообмена в промышленной изоляции. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 192 с.
- [10] СНиП 41-03-2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. М.: Изд-во стандартов, 2004. – 28 с.