

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фистуль В.И. Новые материалы (состояние, проблемы, перспективы). – М.: МИСиС, 1995. – 141 с.
2. Батаев А.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение. – М.: Логос, 2006. – 398 с.
3. Валиев Р.З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. – М.: Логос, 2000. – 272 с.
4. Болтон У. Конструкционные материалы: металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты: пер. с англ. 2-е изд. – М.: Додека-XXI, 2007. – 320 с.
5. Пономарев С.В., Мищенко С.В., Дивин А.Г. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений. В 2 кн. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. – Кн. 1. – 206 с.; Кн. 2. – 236 с.
6. Чернышева Т.И., Чернышев В.Н. Методы и средства неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов. – М.: Машиностроение, 2001. – 240 с.
7. Фокин В.М., Чернышев В.Н. Неразрушающий контроль теплофизических характеристик строительных материалов. – М.: Машиностроение, 2004. – 276 с.
8. Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P. et al. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity // J. of Appl. Physics. – 1961. – V. 32. – № 9. – P. 1675–1684.
9. Варламов Г.Б., Дешко В.И., Карвацкий А.Я. Модификационный метод мгновенного источника для определения коэффициента температуропроводности // Промышленная теплотехника. – 1987. – Т. 9. – № 3. – С. 80–83.
10. Медведев В.В. Импульсный тепловой метод определения теплофизических характеристик конструкционных материалов ядерных реакторов // Физико-технические проблемы атомной энергетики и промышленности (производство, наука, образование): Труды Междунар. научно-практ. конф. – Томск, 2004. – С. 149.
11. Пат. 2184952 РФ. МПК⁶ G01N 25/18. Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов / И.Н. Ищук, Т.А. Фесенко, В.В. Обухов. Заявлено 17.07.2000; Опубл. 10.07.2002, Бюл. № 5. – 3 с.
12. Каспаров К.Н. Исследование динамики температуры при импульсном нагреве методом фотоэмиссионной пирометрии // Измерительная техника. – 2006. – № 9. – С. 34–36.
13. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983. – 616 с.
14. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейдлин А.Е. Техническая термодинамика. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 416 с.
15. Коздоба Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности. – М.: Наука, 1975. – 227 с.
16. Технологические лазеры. Справочник в 2-х т. / Под ред. Г.А. Абилинского. – М.: Машиностроение, 1991. – Т. 1. – 431 с.
17. Андрианов А.Н., Баранов В.Г., Годин Ю.Г. и др. Автоматизированная установка «Квант-Б» для измерения теплофизических свойств реакторных материалов // Труды VII Российской конф. по реакторному материаловедению. – Димитровград, 2003. – С. 87–93.

Поступила 22.10.2008 г.

УДК 621.643.001:536.2

АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ТЕПЛОТРУБОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ УВЛАЖНЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ С УЧЕТОМ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ ВЛАГИ

Г.В. Кузнецов, В.Ю. Половников

Томский политехнический университет

E-mail: polov@tpu.ru

Проведено численное исследование тепломассопереноса во влагонасыщенной тепловой изоляции теплотрубопровода с учетом испарения влаги в пористой структуре теплоизоляционного материала. Установлено, что учет процесса испарения позволяет существенно уточнить величину тепловых потерь теплотрубопроводов в условиях затопления каналов тепловых сетей.

Ключевые слова:

Математическое моделирование, теплотрубопровод, испарение, фазовые переходы, фильтрация.

Введение

Транспортные тепловые потери являются важным показателем работы теплопроводов, характеризующим эффективность расходования энергетических ресурсов. Достоверность и точность определения транспортных потерь тепла в сетях теплоснабжения чрезвычайно важны, так как в последнее время отмечаются их многочисленные некачественные, существенно завышенные оценки [1] – до 40 % всего транспортируемого тепла, а по некоторым данным они в 5...9 раз превышают нормативные [1].

Целью данной работы является математическое моделирование тепловых режимов и численный ана-

лиз тепловых потерь теплотрубопроводов в условиях затопления каналов тепловых сетей с учетом процесса испарения влаги в слое тепловой изоляции.

Постановка задачи

Рассматривается теплотрубопровод, окруженный со всех сторон водой. Предполагается, что вода, проникая в пористую структуру тепловой изоляции, формирует подвижную границу, на которой происходит испарение влаги, а образовавшийся пар, вследствие роста давления, фильтруется в направлении к внутренней поверхности тепловой изоляции трубопровода.

При постановке задачи приняты следующие допущения:

1. Теплофизические свойства веществ являются постоянными и известными величинами.
2. Потери тепла не влияют на температуру внутренней поверхности изоляции.
3. Не рассматривается процесс конденсации пара в слое теплоизоляции.

Математическая модель

Рассматривается нестационарная нелинейная задача тепломассопереноса в поперечном сечении изоляции теплотрубопровода. Задача решалась в цилиндрической системе координат, начало которой связано с осью симметрии трубы. Одномерное нестационарное уравнение неразрывности для фильтрующейся в слое тепловой изоляции воды представлялось в следующей форме:

$$\tau > 0, R_1 \leq r \leq R_2, \quad \frac{\partial \varphi_{ж}}{\partial \tau} + \frac{\partial (U_{ж} \varphi_{ж})}{\partial r} + \frac{U_{ж}}{r} \varphi_{ж} = 0; \quad (1)$$

$$\rho_{ж} = \text{const};$$

$$\tau = 0, R_1 \leq r \leq R_2, \quad \varphi_{ж} = 0; \quad (2)$$

$$\tau > 0, r = R_2, \quad \varphi_{ж} = f. \quad (3)$$

Обозначения: φ – объемная доля компоненты; τ – время, с; U – скорость фильтрации, м/с; r – координата, м; R – граница области расчета, м; ρ – плотность, кг/м³; f – пористость; ж – жидкость; 1, 2 – внутренняя и внешняя поверхности изоляции.

Скорость движения жидкости $U_{ж}$ определялась по закону Дарси:

$$R_1 \leq r \leq R_2, \quad U_{ж} = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial r}; \quad (4)$$

$$r = R_1, \quad P = P_1; \quad (5)$$

$$r = R_2, \quad P = P_2, \quad (6)$$

где: k – проницаемость, м²; μ – вязкость, Па·с; P – давление, Па.

Уравнение неразрывности для паровой компоненты представлялось в виде:

$$\tau > 0, R_1 \leq r \leq R_2,$$

$$\frac{\partial (\rho_n \varphi_n)}{\partial \tau} + \frac{\partial (U_n \rho_n \varphi_n)}{\partial r} + \frac{U_n \rho_n}{r} \varphi_n = 0; \quad (7)$$

$$\rho_n = \frac{PM}{R_g T}; \quad (8)$$

$$\tau = 0, R_1 \leq r \leq R_2, \quad \varphi_n = 0; \quad (9)$$

$$\tau > 0, r = R_{тр}, \quad \varphi_n = \varphi_{тр}. \quad (10)$$

Здесь: M – молекулярная масса паров, кг/моль; R_g – газовая постоянная, Дж/(моль·К); T – температура, К; $R_{тр}$ – координата подвижной границы испарения, м; $\varphi_{тр}$ – объемная доля пара на подвижной границе испарения; п – пар.

Скорость фильтрации пара U_n определялась из уравнения:

$$W = \rho_n U_n,$$

где W – скорость испарения, кг/(м²·с), определяемая из выражения [2]:

$$W = \frac{A(P_{нас} - P_{парц})}{\sqrt{\frac{2\pi R_g}{M} T(\tau, R_{тр})}}. \quad (11)$$

Обозначения: $P_{нас}$ – давление насыщения, Па; $P_{парц}$ – парциальное давление, Па; A – коэффициент accommodations.

Парциальное давление испаряющейся компоненты в выражении (11) вычислялось методом Риддела-Планка-Миллера [3].

Объемная доля пара на подвижной границе испарения определялась из следующего соотношения: $\varphi_{тр} = V_n / (V_n + V_{ж}) = (m_n / \rho_n) / [(m_n / \rho_n) + (m_{ж} / \rho_{ж})]$, где V – объем, м³; m – масса, кг.

Массы пара m_n и жидкости $m_{ж}$ можно найти из выражений:

$$m_n = \int_0^{\tau} W S d\tau;$$

$$m_{ж} = \rho_{ж} S (R_2 - R_{тр}),$$

где S – единичная площадка, м².

Теплофизические свойства тепловой изоляции рассчитывались как эффективные с учетом объемных долей каждой компоненты. Так, например, эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_{эф}$ рассчитывался из выражения [4]:

$$\lambda_{эф} = \lambda_{тв} \varphi_{тв} + \lambda_{ж} \varphi_{ж} + \lambda_{п} \varphi_{п}. \quad (12)$$

Здесь: λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); эф – эффективный; тв – твердый каркас изоляции.

Объемные доли φ_n , $\varphi_{ж}$ и $\varphi_{п}$ связаны между собой и с пористостью материала f следующими соотношениями:

$$\varphi_{тв} + \varphi_{ж} + \varphi_{п} = 1; \quad \varphi_{ж} + \varphi_{п} = f.$$

Уравнение теплопроводности для рассматриваемой области решения в одномерной постановке имеет вид:

$$\tau > 0, R_1 \leq r \leq R_2,$$

$$c_{эф} \rho_{эф} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda_{эф} r \frac{\partial T}{\partial r} \right) - QW \frac{F}{V}; \quad (13)$$

$$\tau = 0, R_1 \leq r \leq R_2, \quad T = T_0 = \text{const}; \quad (14)$$

$$\tau > 0, r = R_1, \quad T = T_1 = \text{const}; \quad (15)$$

$$\tau > 0, r = R_2, \quad -\lambda_{эф} \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha (T_2 - T_{окр}). \quad (16)$$

Обозначения: c – теплоемкость, Дж/(кг·К); α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); Q – теплота фазового перехода, Дж/кг; F – площадь, м²; 0 – начальный момент времени; окр – окружающая среда.

Наличие испарения влаги в пористой структуре тепловой изоляции учитывается введением в уравнение теплопроводности (13) дополнительного члена (последний в правой части). При этом координата подвижной границы испарения R_p определялась из совместного решения системы уравнений (1)–(16).

Условие прекращения процессов фильтрации пара и воды в слое теплоизоляционного материала вводилось в виде равенства давлений:

$$P_{\text{п}} = P_{\text{атм}} + P_{\text{ст.воды}},$$

где $P_{\text{п}} = \frac{R_g T \rho_{\text{п}}}{M}$; $P_{\text{ст.воды}} = \rho_{\text{ж}} g h$.

Здесь: $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, Па; $P_{\text{ст.воды}}$ – гидростатическое давление столба воды, Па; g – ускорение свободного падения, м²/с; h – высота столба воды над поверхностью изоляции теплотрубопровода, м.

При постановке задачи предполагалось, что на внешнем контуре теплотрубопровода теплообмен осуществляется в условиях свободной конвекции. Средние коэффициенты теплоотдачи в режимах естественной конвекции определялись по критериальным уравнениям [5]:

$$10^4 < Gr Pr < 10^9, \quad Nu = 0,47(Gr Pr)^{1/4};$$

$$Gr Pr > 10^9, \quad Nu = 0,1(Gr Pr)^{1/3},$$

где Nu, Gr, Pr – соответственно числа Нуссельта, Грасгофа и Прандтля.

Выражение для расчета тепловых потерь q_L , отнесенных к единице длины трубопровода, имеет следующий вид:

$$q_L = -\lambda_{\text{эф}} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_2} \frac{F_2}{L}.$$

Здесь: q_L – линейные тепловые потери, Вт/м; L – единица длины трубопровода, м; F_2 – площадь наружной поверхности теплотрубопровода, м².

Метод решения и исходные данные

Система уравнений (1)–(16) решена методом конечных разностей [6]. Уравнение (13) решено с использованием неявной четырехточечной разностной схемы, а уравнения (1) и (7) с помощью схемы «неявный уголок». Разностные аналоги уравнений (1)–(16) разрешены методом «прогонки» [6].

Исследования проводились для трубопровода 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 $T_0=282$ К. Диапазон изменения температуры внутренней поверхности изоляции T_1 задавался в пределах 373...403 К и соответствовал типичным температурам теплоносителя в тепловых сетях. Температура окружающей теплотрубопровод среды принималась равной $T_{\text{окр}}=296$ К.

Перепад давлений, необходимый для расчета скорости фильтрации воды, задавался параметрически и соответствовал гидростатическому давлению столба жидкости h над верхней точкой тепловой изоляции трубопровода. Высота столба жидкости h над поверхностью изоляции трубопровода варьировалась в диапазоне от 10 до 100 мм (например, разности давлений 100 Па соответствует слой воды толщиной $h=10$ мм).

Результаты исследований

Результаты численных исследований приведены в таблицах. Анализ проводился для периода времени, соответствующего выходу процессов теплопереноса на стационарный режим.

Обоснованность и достоверность результатов численных исследований следует из проведенных проверок используемых методов решения на сходимость и устойчивость 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 теплопереноса в тепловой изоляции теплотрубопроводов.

В табл. 1 представлены результаты численного анализа тепловых потерь, а также приведено сравнение полученных данных с нормативными значениями [7].

Таблица 1. Результаты численных исследований тепловых потерь теплотрубопроводов

$h, \text{ м}$	$T_1, \text{ К}$	q_L (с учетом испарения), Вт/м	q'_L (без учета испарения), Вт/м	$\frac{q'_L - q_L}{q'_L} 100\%$	Отклонение от СНиП 41-03-2003 [7], ед.
0,01	373	992,19	1091,5	9,10	8,74
	383	997,80	1233,8	19,1	8,07
	393	1017,0	1376,2	26,1	7,62
	403	1019,8	1518,5	32,8	7,10
0,05	373	1010,2	1091,5	7,40	8,89
	383	1020,4	1233,8	17,3	8,26
	393	1031,9	1376,2	25,0	7,73
	403	1047,1	1518,5	31,0	7,30
0,1	373	1028,9	1091,5	5,70	9,06
	383	1047,0	1233,8	15,1	8,48
	393	1063,0	1376,2	22,7	7,96
	403	1076,1	1518,5	29,1	7,50

Предварительно было проведено численное моделирование работы теплотрубопровода в условиях затопления каналов тепловых сетей с использованием математической модели, не учитывающей наличие испарения влаги в пористой структуре теплоизоляции. Математическая постановка задачи в этом случае аналогична математической модели представленной в данной работе. Результаты численного исследования тепловых потерь теплотрубопровода в условиях затопления без учета наличия испарения влаги в тепловой изоляции приведены в табл. 1.

В результате численного исследования температурных полей во влагонасыщенной тепловой изоляции трубопровода, проведенного на базе математической модели (1)–(16) было установлено, что тепловые потери (табл. 1) теплопровода в условиях максимального влагонасыщения теплоизоляции существенно превышают нормированную величину теплотерь [7]. При этом главным фактором, влияющим на рост тепловых потерь при эксплуатации теплопроводов, имеющих влагонасыщенную тепловую изоляцию, является увеличение эффективной теплопроводности изоляции при насыщении ее влагой. Сопоставление результатов численного моделирования с нормативными показателями [7] тепловых потерь (табл. 1) показывает, что теплотери теплопровода в условиях максимального влагонасыщения превышают нормированную величину в 7...9 раз.

Из данных, приведенных в табл. 1, видно, что учет эффекта испарения позволяет уточнить величину потерянной тепловой энергии при анализе масштабов теплотерь трубопроводов, работающих в условиях увлажнения изоляции. Определяющими параметрами являются температура внутренней поверхности тепловой изоляции трубопровода T_1 и высота столба воды над верхней точкой изоляции трубопровода h . Так, в зависимости от значений параметров T_1 и h , относительная величина линейных тепловых потерь q_L изменяется от 5,7 до 32,8 %.

Следствием наличия испарения влаги в пористой структуре теплоизоляции трубопровода является формирование вблизи внутренней поверхности изоляции паровой прослойки, ширина которой тем больше, чем больше температура T_1 и меньше величина h . Образовавшаяся паровая область играет роль своего рода «теплоизолятора», что приводит к снижению тепловых потерь (табл. 1). Это

снижение q_L объясняется тем, что теплопроводность водяного пара существенно ниже теплопроводности воды, а, следовательно, эффективная теплопроводность тепловой изоляции будет соответствующим образом уменьшаться, что, в конечном итоге, и приводит к снижению уровня тепловых потерь.

В табл. 2 приведены размеры паровой области для рассматриваемой конфигурации теплотрубопровода.

Таблица 2. Ширина паровой области, м

$h, \text{ м}$		0,1	0,05	0,01
$T_1, \text{ К}$	373	$3 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
	383	$9 \cdot 10^{-4}$	$10 \cdot 10^{-4}$	$12 \cdot 10^{-4}$
	393	$15 \cdot 10^{-4}$	$17 \cdot 10^{-4}$	$18 \cdot 10^{-4}$
	403	$21 \cdot 10^{-4}$	$23 \cdot 10^{-4}$	$25 \cdot 10^{-4}$

Как видно из табл. 2, ширина паровой области сравнительно мала, однако наличие даже такой малой области «теплоизолятора» приводит к заметному снижению тепловых потерь (табл. 1) трубопровода, работающего в условиях увлажнения тепловой изоляции.

Выводы

Теоретически показано, что тепловые потери теплотрубопроводов, имеющих увлажненную теплоизоляцию, значительно превышают нормативные значения тепловых потерь (до 9 раз).

Установлено, что учет наличия эффекта испарения влаги в слое теплоизоляционного материала позволяет существенно уточнить величину тепловых потерь теплотрубопроводов в условиях затопления.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 08-08-00143-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шишкин А.В. Определение потерь тепла в сетях централизованного теплоснабжения // Теплоэнергетика. – 2003. – № 9. – С. 68–74.
2. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. – М.: Энергия, 1976. – 392 с.
3. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.
4. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. – М.: Физматгиз, 1962. – 456 с.
5. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.
6. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. – М.: Наука, 1984. – 288 с.
7. СНиП 41-03-2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. – М.: Издательство стандартов, 2004. – 25 с.

Поступила 05.09.2008 г.