

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ИЗОЛЯЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ, ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ В УСЛОВИЯХ ЗАТОПЛЕНИЯ

*В.Ю. Половников, к.т.н., доц., Е.В. Губина, студентка гр. 5БМ2В
Томский политехнический университет, 634050, г.Томск, пр.Ленина,30, тел.
(3822)-420-833
E-mail: KatyaTomsk@sibmail.com*

Уровень тепловых потерь в тепловых сетях РФ оценивается в 30 % полезного теплоснабжения абонентов [1]. Отдельный интерес представляет анализ тепловых потерь теплопроводов в условиях увлажнения изоляции [2]. При этом в [2] не учитывается влияние фазовых переходов в структуре слоя теплоизоляции на интенсификацию тепловых потерь.

Целью данной работы является численный анализ тепловых потерь теплопроводов в условиях увлажнения тепловой изоляции с учетом испарения влаги на границе раздела «стенка трубы – слой изоляции».

Рассматривается задача теплопроводности в системе «стенка трубы – слой увлажненной теплоизоляции». На границе раздела «стенка трубы – слой увлажненной изоляции» учтен процесс испарения. На рис. 1 показана область решения рассматриваемой задачи.

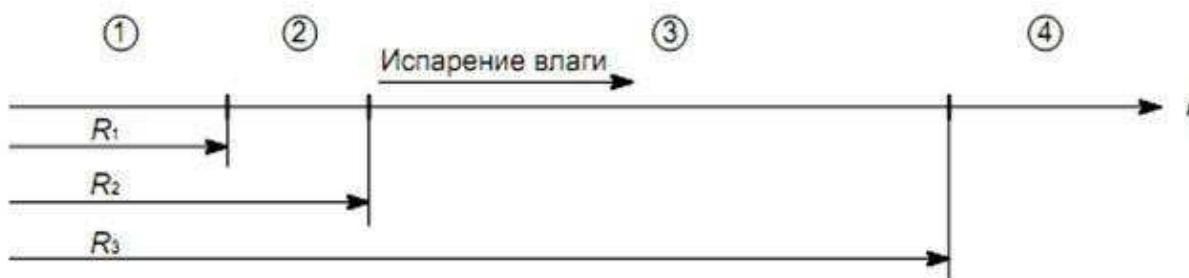


Рис. 1. Схематическое изображение области решения: 1 – теплоноситель; 2 – стенка трубы; 2 – слой увлажненной изоляции; 4 – окружающая среда.

Математическая модель

Математическая постановка задачи имеет вид:

$$\frac{\partial T_{тр}}{\partial \varphi} = a_{тр} \left(\frac{\partial^2 T_{тр}}{\partial r^2} + \frac{\partial T_{тр}}{\partial r} \right), \quad R_1 \leq r \leq R_2; \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_{из}}{\partial \varphi} = a_{эф} \left(\frac{\partial^2 T_{из}}{\partial r^2} + \frac{\partial T_{из}}{\partial r} \right), \quad R_2 < r \leq R_3. \quad (2)$$

$$\varphi = 0, \quad R_1 \leq r \leq R_3, \quad T_{тр} = T_{из} = T_0 = \text{const}. \quad (3)$$

$$\varphi > 0, \quad r = R_1, \quad T_{тр} = T_1 = \text{const}; \quad (4)$$

$$\varphi > 0, \quad r = R_2, \quad -\lambda_{тр} \frac{\partial T_{тр}}{\partial r} = -\lambda_{эф} \frac{\partial T_{из}}{\partial r} - QW; \quad (5)$$

$$\varphi > 0, \quad r = R_3, \quad -\lambda_{эф} \frac{\partial T_{из}}{\partial r} = \beta(T_{из} - T_{ос}). \quad (6)$$

Обозначения: T – температура, К; τ – время, с; a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; r – координата, м; R – граница области расчета, м; λ – теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; Q – теплота фазового перехода, $\text{Дж}/\text{кг}$; W – массовая скорость испарения, $\text{кг}/\text{с}$; α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$.

Индексы: тр – труба; 1, 2, 3 – номера границ; тр – труба; и – изоляция; 0 – начальный момент; эф – эффективный; ос – окружающая среда.

Массовая скорость испарения определялась из соотношения [3]:

$$W = \frac{A(P_{\text{нас}} - P_{\text{парц}})}{\sqrt{\frac{2\pi R_g}{M} T(\tau, R_2)}}$$

где A – коэффициент аккомодации; $P_{\text{нас}}$ – давление насыщения, Па; $P_{\text{парц}}$ – парциальное давление испаряющейся компоненты, Па; R_g – газовая постоянная, $\text{Дж}/(\text{кмоль}\cdot\text{К})$; M – молекулярная масса паров, $\text{кг}/\text{моль}$.

Коэффициент аккомодации вычислялся по формуле [4]:

$$A = \frac{0,059}{P_{\text{нас}}^{0,5}}$$

Парциальное давление испаряющейся компоненты определялось по аналогии с процессом поверхностного испарения [5]:

$$\psi = \frac{P_{\text{парц}}}{P_{\text{нас}}} = \frac{m_{\text{в}}}{m_{\text{в}} + m_{\text{п}}},$$

где: m – массовая доля; в – вода; п – пар.

Исходя из физических соображений, ясно, что $m_{\text{в}}$ значительно больше $m_{\text{п}}$. Следовательно, для рассматриваемой задачи можно принять ψ как параметр: $\psi \approx 0,999\dots 0,995$.

Теплофизические свойства слоя увлажненной изоляции определялись с учетом объемных долей каждой компоненты [6]. Например, эффективная теплопроводность вычислялась из соотношения:

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_{\text{и}}\varphi_{\text{и}} + \lambda_{\text{в}}\varphi_{\text{в}}; \quad \varphi_{\text{в}} + \varphi_{\text{и}} = 1,$$

где: φ – объемная доля.

Задача (1)–(6) решена методом конечных разностей с использованием неявной четырехточечной разностной схемы. Разностные аналоги исходной системы уравнений решены методом «прогонки».

Численный анализ проводился для трубы с диаметром условного прохода 600 мм, изготовленной из стали 10 (толщина 9 мм) и тепловой изоляцией из стеклянной 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 $T_1=363$ К, а температура окружающей трубопровод среды составляла $T_{\text{ос}}=298$ К. Коэффициент теплоотдачи от поверхности изоляции к наружному воздуху принимался равным $\alpha = 11$ $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. Максимальное значение объемной доли воды $\varphi_{\text{в}} = 0,73$.

В таблице 1 приведены значения теплопроводности (λ), теплоёмкости (C), и плотности (ρ) трубопровода, изоляции и воды, использованные при расчетах.

Таблица 1. Теплофизические свойства материалов

Материал	λ , Вт/(м·К)	C , кДж/(кг·К)	ρ , кг/м ³
Сталь 10	57,7	0,466	7860
Стекловата	0,059	0,67	206
Вода	0,571	4,2	1000

Результаты численного моделирования, приведенные в таблице 2, свидетельствуют об ожидаемом росте тепловых потерь теплопровода q_1 с увеличением объемной доли влаги φ_v в пористой структуре слоя тепловой изоляции.

Таблица 2. Результаты численного анализа тепловых потерь по величине объемной доли влаги в слое тепловой изоляции

φ_v	q_1 , Вт/м	$\Delta_1 = \frac{q_1^{\#0} - q_1^{u=0}}{q_1^{\#0}}, 100\%$
0	110,19	-
0,2	271,53	59,4
0,4	404,09	72,7
0,6	515,26	78,6
0,73	578,61	81,0

Величиной δ_2 обозначен рост тепловых потерь теплопровода q_2 по сравнению с потерями без учета испарения при $\varphi_v = 0$ (таблица 2), а значения δ_3 характеризуют отклонения в расчетах тепловых потерь с учетом и без учета испарения при $\varphi_v \neq 0$.

Таблица 3. Результаты численного моделирования по параметру ψ

φ_v	ψ	q_2 , Вт/м	$\Delta_2 = \frac{q_2 - q_1^{u=0}}{q_2}, 100\%$	$\Delta_3 = \frac{q_2 - q_1^{u=0}}{q_2}, 100\%$
0,2	0,999	329,63	66,6	17,6
	0,997	445,84	75,3	39,1
	0,995	562,05	80,4	51,7
0,4	0,999	462,17	76,2	12,6
	0,997	578,33	80,9	30,1
	0,995	694,50	84,1	41,8
0,6	0,999	573,33	80,8	10,1
	0,997	689,46	84,0	25,3
	0,995	805,60	86,3	36,0
0,73	0,999	636,61	82,7	9,1
	0,997	752,72	85,4	23,1
	0,995	868,84	87,3	33,4

Отклонение в результатах расчета тепловых потерь с учетом и без учета испарения влаги составляет $\delta_3=9,1-51,7\%$, что свидетельствует о необходимости учета наличия испарения при проведении анализа тепловых режимов теплопроводов, работающих с увлажненной изоляцией.

Вклад эффекта испарения в суммарные тепловые потери составляет от 1,7 до 21 % (табл. 2, 3) в зависимости от значений φ_v и ψ . Анализ нестационарности процессов теплопереноса для рассматриваемой задачи свидетельствует о том, что

время выхода процессов на стационарный режим не превышает 20 000 секунд, что хорошо согласуется с результатами проведенных ранее исследований [2].

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

Список литературы:

1. Ватин Н.И., Дубов В.В., Петраков Г.П. Внедрение РМД 41-11-2012 Санкт-Петербург «Устройство тепловых сетей в Санкт-Петербурге». – 2013. – № 1(6). – С. 48–54.
2. 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.
3. Полежаев Ю. В., Юревич Ф. Б. Тепловая защита. – М.: Энергия, 1976. – 392 с.
4. Санду С.Ф. Математическое моделирование процессов переноса тепла и массы в испарительно-конденсационных системах теплопередачи энергетических установок // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 4. – С. 60–63.
5. Берман Л.Д. Испарительное охлаждение циркуляционной воды. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1949. – 440 с.
6. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. – М.-Л.: Физматгиз, 1962. – 456 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КОМПОЗИТОВ ТЭН-НИКЕЛЬ К ДЕЙСТВИЮ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Зыков И.Ю. аспирант, Каленский А.В. д.ф.-м.н., профессор, Боровикова А.П. к.ф.-м.н., Лукатова С.Г. магистрант гр. X-134

*Кемеровский государственный университет 650043, Россия, г. Кемерово,
ул. Красная 6, тел. (+73842) 580591*

E-mail: kriger@kemsu.ru

Создание энергетических материалов селективно чувствительных к лазерному излучению для получения капсульных составов для оптических детонаторов ведется уже более двух десятилетий [1]. Для возникновения взрывного разложения необходимо наличие механизмов сильной положительной обратной связи, которые могут приводить к самоускорению химической реакции: увеличение температуры, приводящее к экспоненциальному росту скорости реакции [2] (тепловой взрыв), и лавинообразное увеличение неравновесной концентрации реагентов, также приводящее к росту скорости реакции [3,4] (цепной взрыв).

В работах [5-6] показано, что добавки наночастиц алюминия позволяют значительно снизить критическую плотность энергии лазерного инициирования ТЭНа. Полученные материалы проявляют чувствительность к импульсу первой гармоники неодимового лазера (длиной волны 1064 нм) на уровне 1 Дж/см² при неизменном пороге инициирования ударом, что вызвало интерес к композитным