

УДК 621.643.001:536.2

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ КАНАЛЬНЫХ ТЕПЛОТРУБОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ВЛАЖНЫМ ВОЗДУХОМ

В.С. Логинов, В.Ю. Половников

Томский политехнический университет

E-mail: polov@tpu.ru

Проведено численное исследование тепломассопереноса в тепловой изоляции теплотрубопровода, проложенного канальным способом, в условиях взаимодействия с влажным воздухом. Установлены закономерности тепломассообмена и масштабы тепловых потерь канального теплотрубопровода с влажным воздухом.

Ключевые слова:

Математическое моделирование, теплотрубопровод, тепловые потери, диффузия, массообмен.

Введение

Численное моделирование тепловых режимов теплотрубопроводов является актуальной задачей при разработке энергосберегающих систем передачи тепловой энергии. При этом характеристика теплотрубопроводов по величине тепловых потерь является особо важным показателем, отражающим действительное состояние тепловых сетей.

В настоящее время основной причиной роста тепловых потерь трубопроводов является [1, 2] изменение термовлажностных условий работы тепловых сетей и в первую очередь — эксплуатация теплотрубопроводов, имеющих влагонасыщенную теплоизоляцию. При этом наиболее типичным механизмом увлажнения тепловой изоляции теплотрубопроводов является [2] насыщение теплоизоляционного материала влагой, содержащейся в воздухе канального пространства.

Целью данной работы является математическое моделирование тепломассопереноса в тепловой изоляции трубопровода канальной прокладки и численный анализ тепловых потерь при его эксплуатации в условиях увлажнения изоляции влагой, содержащейся в воздухе канального пространства.

Постановка задачи

Рассматривается широко распространенная конфигурация теплотрубопровода [1], уложенного в одноячейковый железобетонный канал и теплоизолированного минеральной ватой. Предполагается, что влага, содержащаяся во влажном воздухе, окружающем трубопровод, проникает в пористую структуру теплоизоляции под действием диффузионного механизма массопереноса и вытесняет сухой воздух, содержащийся в слое минеральной теплоизоляции. Следствием влагонасыщения тепловой изоляции является увеличение эффективной теплопроводности теплоизоляционного слоя, а наличие потока массы на внешней поверхности теплоизоляции приводит к изменению механизмов тепломассообмена теплотрубопровода с окружающей средой.

С учетом рассматриваемых факторов анализ тепловых потерь сводится к решению одномерной нестационарной задачи тепло- и массопереноса для тепловой изоляции трубопровода.

При постановке задачи на внешней границе рассматриваемой системы «слой теплоизоляции — окружающая среда» выставлялись граничные условия третьего рода, а на внутренней — граничные условия первого рода для задачи теплопереноса и второго рода для задачи влагопереноса. В начальный момент времени считалось, что влага в пористой структуре тепловой изоляции трубопровода отсутствует, а значение температуры в рассматриваемой области равно температуре наружного влажного воздуха.

Математическая модель

Задача решалась в цилиндрической системе координат, начало которой связано с осью симметрии трубы. Математическая постановка задачи тепломассопереноса в тепловой изоляции трубопровода описана при помощи уравнений (1)–(9):

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

$$c_{эф} \rho_{эф} \frac{\partial T_n}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_{эф}(\tau, r) \frac{\partial T_n}{\partial r} \right); \quad (1)$$

$$\tau = 0, R_1 \leq r \leq R_2; \quad T_n = T_{вв}; \quad (2)$$

$$\tau > 0, r = R_1; \quad T_n = T_1 = \text{const}; \quad (3)$$

$$\tau > 0, r = R_2; \quad -\lambda \frac{\partial T_n}{\partial r} = \alpha [T_n(\tau, R_2) - T_{вв}]; \quad (4)$$

$$\tau \geq 0, R_1 \leq r \leq R_2; \quad \frac{\partial C_b}{\partial \tau} = D_n \left(\frac{\partial^2 C_b}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_b}{\partial r} \right); \quad (5)$$

$$\tau = 0, R_1 \leq r \leq R_2; \quad C_b = 0; \quad (6)$$

$$\tau > 0, r = R_1; \quad \frac{\partial C_b}{\partial r} = 0; \quad (7)$$

$$\tau > 0, r = R_2; \quad -D_n \frac{\partial C_b}{\partial r} = \beta [C_b(\tau, R_2) - C_{б,вв}]. \quad (8)$$

Обозначения: T – температура, К; τ – время, с; r – текущий радиус, м; c – теплоемкость, Дж/(кг·К); ρ – плотность, кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); R – радиус границ области решения, м; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); C – относительная объемная концентрация; D – коэффициент диффузии, м²/с; β – коэффициент массоотдачи, м/с.

Индексы: 1, 2 – соответственно внутренняя и внешняя поверхность изоляции; и – изоляция; эф – эффективный, вв – влажный воздух; в – влага.

Теплофизические свойства тепловой изоляции при насыщении ее влагой рассчитывались как эффективные с учетом объемных долей каждой компоненты. Так, например, эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_{эф}$ рассчитывался из выражения [3]:

$$\lambda_{эф} = \lambda_{и} C_{и} + \lambda_{в} C_{в} + \lambda_{св} C_{св}, \quad (9)$$

при условии что

$$C_{и} + C_{в} + C_{св} = 1,$$

где $\lambda_{св}$, $C_{св}$ – соответственно коэффициент теплопроводности и относительная объемная концентрация сухого воздуха, содержащегося в структуре теплоизоляционного слоя.

Метод решения и исходные данные

Система уравнений (1)–(9) решена методом конечных разностей [4] с использованием неявной разностной схемы, а разностные аналоги уравнений (1)–(9) разрешены методом «прогонки» [4].

Исследования проводились для трубопровода с диаметром условного прохода 600 мм и тепловой изоляцией из минеральной ваты (толщина 70 мм). Температура влажного воздуха, в соответствии с [5], принималась равной $T_{вв}=298$ К, а температура внутренней поверхности изоляции трубопровода – $T_1=373$ К.

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 [6]:

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

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

здесь Gr , Pr , Nu – числа Грасгофа, Прандтля и Нуссельта.

Коэффициент массоотдачи β рассчитывался из отношения [7]:

$$\frac{\alpha}{\beta} = c_{вв} \rho_{вв} \left(\frac{a_{вв}}{D_{вв}} \right)^{0.75},$$

где a – коэффициент температуропроводности, м²/с.

Коэффициент диффузии влажного воздуха $D_{вв}$ вычислялся по формуле [8]:

$$D_{вв} = \frac{0,083 \cdot 10^5}{P_{вв} \left(\frac{T_{вв}}{273} \right)^{1,81}},$$

здесь P – давление, Па.

Объемная доля влаги во влажном воздухе $C_{вв}$ определялась из соотношения:

$$C_{вв} = \frac{\mu_{вв} d}{\mu_{вв}}; \quad d = 0,622 \frac{\varphi P_s}{P_{вв} - \varphi P_s},$$

где μ – молярная масса, d – массовое влагосодержание воздуха, φ – относительная влажность, P_s – давление насыщения.

Линейные тепловые потери q_L теплотрубопровода рассчитывались по следующему выражению:

$$q_L = \alpha [T_{и}(\tau, R_2) - T_{вв}] \frac{F}{L},$$

здесь F – площадь поверхности, м²; L – единица длины, м.

Результаты исследований

Численный анализ проводился для периода времени, соответствующего выходу процессов тепло- и массопереноса на стационарный режим. Обоснованность и достоверность результатов численных исследований следует из проведенных проверок используемых методов решения задач на сходимость и устойчивость, а также 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 теплотрубопроводов.

В таблице приведены типичные результаты численных исследований.

Таблица. Результаты численных исследований тепловых потерь трубопроводов

φ , %	0	25	50	75	100
q_L , Вт/м	106,7	116,1	121,9	126,9	131,5
q_L , Вт/м ($C_s=0$)	106,7	113,3	116,3	118,2	119,7

В результате численного моделирования температурных полей в теплоизоляции трубопровода, проведенного на базе математической модели (1)–(9) было установлено, что тепловые потери трубопровода (табл.) в условиях увлажнения изоляции влагой, содержащейся во влажном воздухе канального пространства, в целом достаточно близки к нормированному значению теплотерь (по данным [9] нормативная величина линейных тепловых потерь для трубопровода с диаметром условного прохода 600 мм составляет 114 Вт/м).

Рост тепловых потерь трубопровода (табл.) объясняется с одной стороны увеличением эффективной теплопроводности материала изоляции вследствие его насыщения влагой из влажного воздуха, а с другой – увеличением коэффициентов те-

плоотдачи для воздуха, имеющего большую относительную влажность φ .

В результате проведения серии численных экспериментов было выявлено, что для диапазона варьируемых в данной работе параметров величина объемной доли влаги в пористой структуре тепловой изоляции изменяется в пределах от 0,0031 до 0,0126, а расчетные значения коэффициентов теплоотдачи $\alpha = 2,64 \dots 5,19$ Вт/(м²·К). Здесь следует отметить, что величина объемного влагосодержания изоляции лимитирована значением относительной влажности воздуха и в рамках предложенной модели не может превышать объемной доли влаги $C_{v, \text{вв}}$.

Сравнение результатов численных исследований тепловых потерь теплотрубопровода (табл.) в условиях взаимодействия с влажным воздухом и отсутствия влаги в пористой структуре теплоизоляции ($C_v = 0$) позволяет сделать вывод о том, что реализация режима работы теплотрубопровода, исключающего возможность проникновения влаги в слой тепловой изоляции, позволит минимизировать потери тепловой энергии. На практике данное положение может быть реализовано нанесением на внешнюю поверхность тепловой изоляции слоя надежного гидроизоляционного материала. Анализ расчетных значений тепловых потерь, приведенных в таблице, свидетельствует о том, что снижение потерь тепловой энергии теплотрубопроводов в условиях контакта с влажным воздухом при применении надежно гидроизолированных трубопроводов может составлять величину до 9 %.

Анализ нестационарности влагонасыщения тепловой изоляции позволяет говорить о том, что длительность этого процесса является достаточно незначительной, имеет значение от $7,5 \cdot 10^3$ до 10^4 с, и определяется значением коэффициента диффузии материала изоляции $D_{\text{и}}$ и объемным влагосодержанием воздуха $C_{v, \text{вв}}$. Следовательно, нестационарностью процесса насыщения изоляции влагой, содержащейся в воздухе канального пространства, можно обоснованно пренебречь и в практических расчетах использовать стационарную модель рассматриваемой системы.

Выводы

Разработаны математическая модель тепловлагодиффузионного переноса и методика численного анализа величины тепловых потерь при эксплуатации теплотрубопровода в условиях увлажнения изоляции влагой, содержащейся в воздухе канального пространства.

Показано, что применение гидроизоляции позволяет снизить до 9 % тепловые потери канального теплотрубопровода, работающего в условиях контакта с влажным воздухом.

Установлено, что в рамках предложенной модели период выхода процесса влагонасыщения на стационарный режим может быть исключен из рассмотрения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 08-08-00143-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.: Физматгиз, 1962. – 456 с.
4. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. – М.: Наука, 1984. – 288 с.
5. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. – М.: МЭИ, 1999. – 472 с.
6. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.
7. Каст В., Кришер О., Райнике Г., Винтермантель К. Конвективный тепло- и массоперенос. – М.: Энергия, 1980. – 49 с.
8. Петров-Денисов В.Г., Масленников Л.А. Процессы тепло- и влагообмена в промышленной изоляции. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 192 с.
9. СНиП 41-03-2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. – М.: Издательство стандартов, 2004. – 28 с.

Поступила 05.09.2008 г.