

УДК 621.643.001:536.2

КУЗНЕЦОВ Г.В., Половников В.Ю.

Томский политехнический университет, Россия

## ТЕПЛОВЫЕ ПОТЕРИ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ ЗАТОПЛЕНИЯ

Числово розв'язано задачу нестационарного температурного поля для тришарового циліндра „стінка труби – шар ізоляції – шар води”. На границі „теплоізоляція – вода” враховано наявність випаровування. Установлено, що затоплення трубопроводу спричиняє у типових умовах роботи магістральних тепломереж збільшення теплових втрат понад 5,5 рази. При цьому частка теплових втрат, пов'язаних з випаровуванням, становить 2,4...11,1 відсотка, а зростання вологовмісту ізоляції призводить до відповідного збільшення інтенсивності тепловідводу з зовнішньої поверхні трубопроводу.

Численно решена задача о нестационарном температурном поле для трехслойного цилиндра “стенка трубы – слой изоляции – слой воды”. На границе “теплоизоляция – вода” учтено наличие испарения. Установлено, что затопление теплопровода приводит в типичных условиях работы магистральных теплосетей к увеличению тепловых потерь более чем в 5,5 раз. При этом доля тепловых потерь связанных с испарением составляет от 2,4 до 11,1 %, а рост влагосодержания изоляции ведет к соответствующему росту интенсивности теплоотвода с внешней поверхности трубопровода.

We obtain a numerical solution of the problem of nonstationary temperature field for a three-layer cylinder “pipe wall-layer-water layer”. Evaporation on the “isolation-water” boundary was taken into consideration. We have established that the flooding of a heat main pipeline under typical operating conditions leads to an increase in the heat losses by more than 5.5 time. The portion of heat losses due to evaporation constitutes from 2.4 to 11.1 %, and an increase in the water content of isolation leads to the corresponding growth of the intensity of heat withdrawal from the external side of a pipeline.

$A$  – коэффициент accommodations;  
 $a$  – коэффициент температуропроводности;  
 $C$  – теплоемкость  
 $M$  – молекулярная масса паров;  
 $m$  – массовая доля;  
 $P$  – давление;  
 $Q$  – теплота фазового перехода;  
 $q_L$  – линейная плотность теплового потока;  
 $R_g$  – газовая постоянная;  
 $R$  – радиус;  
 $r$  – координата;  
 $T$  – температура;  
 $W$  – скорость испарения;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  
 $\rho$  – плотность;  
 $\tau$  – время;

$\varphi$  – объемная доля;  
 $\psi$  – отношение парциального давления к давлению насыщения.

### Індекси:

” – парциальное давление испаряющихся компонентов;  
 $0$  – начальный момент времени;  
 $1, 2, 3, 4$  – границы области расчета;  
 ТР – труба;  
 И – изоляция;  
 В – вода (воздух);  
 эф – эффективный;  
 нас – насыщение;  
 $p_1$  – внутренняя поверхность;  
 $p_2$  – наружная поверхность.

### Введение

В России один из самых высоких уровней централизованного теплоснабжения (до 80 %) [1]. На ее территории проложено около 280 тысяч километров тепловых сетей (в двухтрубном исчислении).

Актуальность задачи определения потерь теплоты в сетях теплоснабжения вызвана следующими факторами [2]:

возрастанием требований к эффективности теплоснабжения;

нарастающей конкуренцией со стороны альтернативных, децентрализованных способов обеспечения теплотой;

усилением роли приборного учета потребления теплоты и теплоносителя у абонентов;

необходимостью диагностики технического состояния теплопроводов и проведения работ

по повышению надежности системы тепло-снабжения.

Достаточно часто по объективным причинам (ливневые дожди, быстрое таяние снега весной, аварии в системах водоснабжения или водоудаления и др.) происходит полное или частичное затопление магистральных трубопроводов на длительные сроки. При этом влагосодержание тепловой изоляции становится равным максимальному значению, характерному для данного теплоизоляционного материала, причем потери теплоты во много раз превышают нормативные [3].

В этих условиях изменяется механизм теплообмена внешней поверхности трубопровода с окружающей средой и возможно существенное увеличение тепловых потерь при транспорте теплоносителя. В то же время анализ тепловых потерь в рассматриваемых системах проводится пока с использованием моделей, не учитывающих реальные механизмы теплообмена внешней поверхности теплотрубопровода с окружающей средой [4].

Целью данной работы является математическое моделирование процессов теплопереноса в стенке трубопровода и анализ тепловых потерь с поверхности магистрального теплотрубопровода при его затоплении водой.

### Постановка задачи

Рассматривается задача теплопроводности для трехслойного цилиндра “стенка трубы – слой изоляции – слой воды”. На внутренней границе трубы задается граничное условие первого рода. В слое воды выделяется граница, достаточно далеко расположенная от внешней поверхности. Эта граница принимается внешней границей области решения, на которой выставляются граничные условия первого рода. На границе “теплоизоляция – вода” учтено наличие испарения.

Задача решалась при следующих основных допущениях:

на границах между слоями выполняется условие идеального теплового контакта;

теплофизические характеристики слоев являются постоянными величинами;

в слое воды теплота передается только теплопроводностью.

### Математическая модель

Задача была решена в цилиндрической системе координат, начало координат связано с осью симметрии трубы. Система уравнений теплопроводности для рассматриваемой области имеет вид:

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

$$\frac{\partial T_{\text{И}}}{\partial \tau} = a_{\text{И}} \left( \frac{\partial^2 T_{\text{И}}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{\text{И}}}{\partial r} \right), \quad R_2 < r < R_3; \quad (2)$$

$$\frac{\partial T_{\text{В}}}{\partial \tau} = a_{\text{В}} \left( \frac{\partial^2 T_{\text{В}}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{\text{В}}}{\partial r} \right), \quad R_3 < r \leq R_4; \quad (3)$$

Начальные условия:

$$\tau = 0, R_1 \leq r \leq R_4, \quad T_{\text{TP}} = T_{\text{И}} = T_{\text{В}} = T_0 = \text{const}; \quad (4)$$

Граничные условия:

$$\tau > 0, r = R_1, \quad T_{\text{TP}} = T_{\text{И}} = \text{const}. \quad (5)$$

$$\tau > 0, r = R_2, \quad -\lambda_{\text{TP}} \left. \frac{\partial T_{\text{TP}}}{\partial r} \right|_{r=R_2} = -\lambda_{\text{И}} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_2}, \quad (6)$$

$$T_{\text{TP}} \Big|_{r=R_2} = T_{\text{И}} \Big|_{r=R_2},$$

$$\tau > 0, r = R_3, \quad -\lambda_{\text{И}} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R_3} = -\lambda_{\text{В}} \left. \frac{\partial T_{\text{В}}}{\partial r} \right|_{r=R_3} - Q \cdot W, \quad (7)$$

$$T_{\text{И}} \Big|_{r=R_3} = T_{\text{В}} \Big|_{r=R_3},$$

$$\tau > 0, r = R_4, \quad T_{\text{В}} = T_{\text{п2}} = \text{const}. \quad (8)$$

Скорость испарения определялась по формуле [5]

$$W = \frac{A(P_{\text{нас}} - P'')}{\sqrt{\frac{2\pi R_g}{M} \cdot T(\tau, R_3)}}. \quad (9)$$

### Метод решения и исходные данные

Задача (1)-(9) решена методом конечных разностей [6] с использованием неявной четырехуго-

Табл. 1. Теплофизические свойства материалов

Материал	$\lambda, \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$c_p, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$
Сталь 10	57,7	0,466	7860
Стекловата	0,059	0,67	206
Вода	0,571	4,2	1000
Воздух	0,02475	1,005	1,27

чечной разностной схемы. Разностные аналоги исходной системы уравнений решены методом “прогонки” [6]. Особенность решения задачи (1)-(8) состояла в разрыве теплофизических свойств на границах разделов “металл – изоляция”, “изоляция – вода” и наличии нелинейного члена в граничных условиях (7).

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). Толщина слоя воды принималась равной 246 мм. Значение температуры в рассматриваемой области решения в начальный момент времени принималось равным  $T_0 = 282 \text{ K}$ . Температуры внутренней и внешней поверхностей принимались равными соответственно  $T_{п1} = 373 \text{ K}$ ,  $T_{п2} = 282 \text{ K}$ . Парциальное давление испаряющихся компонентов в выражении (9) определялось по аналогии с процессом поверхностного испарения [7]

$$\psi = \frac{P''}{P_{\text{нас}}} = \frac{m_{\text{воды}}}{m_{\text{воды}} + m_{\text{пара}}}, \quad (10)$$

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

Теплофизические свойства слоя изоляции при насыщении его влагой, определялись по известным выражениям [8]. Например, эффективный коэффициент теплопроводности был представлен в виде

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_{\text{и}} \varphi_{\text{и}} + \lambda_{\text{в}} \varphi_{\text{в}}. \quad (11)$$

В табл. 1 приведены теплофизические свойства материалов: трубопровода, изоляции, воды и воздуха, использованные при расчетах.

### Результаты исследования

При проведении численных исследований основное внимание уделялось анализу влияния доли влагосодержания в слое пористой теплоизоляции на интенсивность тепловых потерь, а также масштабности влияния эффекта испарения воды на поверхности теплоизоляции на интенсивность отвода теплоты в окружающую среду.

Рассматривались типичные для эксплуатации трубопроводов режимы как краткосрочного, так и длительного затопления. Короткие периоды затопления характеризуются относительно низкими объемными долями влаги в слое изоляции (0,05...0,2), а длинные – достаточно высокими значениями  $\varphi_{\text{в}}$  (до 1,0).

При проведении численного анализа рассматривались только стационарные режимы затопления, когда значение  $\varphi_{\text{в}}$  не изменялось во времени. Оценки показывают, что для реальных тепловых магистралей более характерны достаточно длительные периоды затопления (сутки и более). В таких случаях происходит насыщение слоя пористой теплоизоляции до высоких значений  $\varphi_{\text{в}}$ .

Из данных табл. 2 и 3 видно, что затопление теплотрубопровода приведет к значительному увеличению тепловых потерь. При этом доля тепловых потерь, связанных с испарением, составляет от 2,4 до 11,1 %, а рост влагосодержания изоляции ведет к соответствующему росту интенсивности теплоотвода с внешней поверхности трубопровода. Тепловые потери с трубопровода без изоляции в условиях его полного затопления водой увеличатся в 19,2 раза по сравнению с проектным режимом работы.

Сопоставление результатов численного моделирования с нормативными показателями тепловых потерь (табл. 2, 3) показывает, что норматив-

Табл. 2. Результаты численного анализа по параметру  $\varphi$ 

Вариант численного эксперимента	$q_L$ , Вт/м	Погрешность по балансу энергии, %	Отклонение от проектного режима	Отклонение от нормативного режима
СНиП 2.04.14 – 88 [9]	122,00	—	—	1
Проектный режим (трубопровод не затоплен)	24,35	0,41	1	—
Затопленный трубопровод (испарение не учитывается)	133,67	0,41	5,49	1,10
Затопленный трубопровод (испарение учитывается $\psi = 0,999$ )	136,98	0,43	5,63	1,12
Затопленный трубопровод (испарение учитывается $\psi = 0,997$ )	143,66	0,46	5,90	1,18
Затопленный трубопровод (испарение учитывается $\psi = 0,995$ )	150,42	0,49	6,18	1,23

Табл. 3. Результаты численного анализа по величине влагосодержания изоляции

Вариант численного эксперимента	$q_L$ , Вт/м	Погрешность по балансу энергии, %	Отклонение от проектного режима	Отклонение от нормативного режима
СНиП 2.04.14 – 88 [9]	122,00	—	—	1
Проектный режим (трубопровод не затоплен)	24,35	0,41	1	—
Затопленный трубопровод $\varphi_B = 0,0$	133,67	0,41	5,49	1,10
Затопленный трубопровод $\varphi_B = 0,05$	176,13	0,41	7,23	1,44
Затопленный трубопровод $\varphi_B = 0,1$	212,21	0,41	8,71	1,74
Затопленный трубопровод $\varphi_B = 0,2$	270,24	0,41	11,10	2,21
Затопленный трубопровод $\varphi_B = 0,4$	350,28	0,41	14,38	2,87
Затопленный трубопровод $\varphi_B = 0,6$	402,86	0,41	17,21	3,30
Затопленный трубопровод $\varphi_B = 0,8$	440,05	0,41	18,10	3,60
Затопленный трубопровод $\varphi_B = 1,0$ (отсутствие изоляции)	467,75	0,41	19,20	3,83

ные показатели тепловых потерь [9] при работе теплотрубопроводов в целом достаточно близки по своим численным значениям к полученным в данной работе значениям  $q_L$  для условий насыщения тепловой изоляции влагой с относительно низким уровнем насыщения (до 10 %). При дальнейшем росте объемной доли воды в слое пористой теплоизоляции величины тепловых потерь растут и все более отличаются от нормативных показателей.

Полученные результаты позволяют также сделать вывод о целесообразности дальнейшего анализа рассматриваемых процессов в рамках более сложной модели, учитывающей динамику процесса насыщения водой слоя пористой теплоизоляции.

Масштабное влияние значений  $\phi_B$  на величину  $q_L$  (табл. 3) показывает, что уточнение величины  $\phi_B$  (как средних, так, возможно, и распределенных по толщине изоляции) может привести к заметному уточнению численных значений как локальных стационарных  $q_L$ , так и нестационарных величин  $q_L$ .

Кроме того, можно учитывать динамику не только затопления магистралей, но и их осушения. В этом варианте также возможно реальное уточнение величин  $q_L$ .

Как показали результаты численных исследований, насыщение водой слоя высокопористой (как правило, высокоэффективной) теплоизоляции приводит к большим потерям тепловой энергии по сравнению с низкопористой изоляцией, которая в обычных условиях менее эффективна.

По этой причине защита теплотрубопроводов от затопления водой является, возможно, одной из эффективных мер снижения потерь тепловой энергии при ее доставке потребителю.

### **Выводы**

Основной причиной интенсификации процесса потери тепловой энергии при затоплении теплотрубопроводов является значительное уве-

личение коэффициента теплопроводности изоляции при насыщении ее водой.

Кроме того, при определенных условиях становится существенной роль процесса испарения при определении тепловых потерь с поверхности теплотрубопроводов.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о перспективности применения разработанной модели и методики численного анализа для оценки масштабов тепловых потерь на магистральных трубопроводах, работающих в условиях затопления.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Бухин В.Е. Предварительно изолированные трубопроводы для систем централизованного теплоснабжения // Теплоэнергетика. — 2002. — №4. — С. 24–29.
2. Шишкин А.В. Определение потерь тепла в сетях централизованного теплоснабжения // Теплоэнергетика. — 2003. — №9. — С. 68–74.
3. Извеков А.В., Коновальцев С.И. Потери тепла в вентилируемых каналах тепловых сетей. // Теплоэнергетика. — 1994. — №12. — С. 37–42.
4. Методические указания по определению тепловых потерь в водяных сетях: РД 34.09.255-97. — М.: СПО ОРГРЭС, 1988. — 18с.
5. Панкратов Б.М., Полежаев Ю.В., Рудько А.К. Взаимодействие материалов с газовыми потоками. — М.: Машиностроение, 1976. — 224с.
6. Самарский А.А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1977. — 656с.
7. Берман Л.Д. Испарительное охлаждение циркуляционной воды. — М.: Госэнергоиздат, 1957. — 320с.
8. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. — М.: Физматгиз, 1962. — 456 с.
9. СНиП 2.04.14-88 Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. — 28с.

*Получено 26.08.2005 г.*