



УДК 597.3

ДИНАМИКА СУШКИ ТЕПЛОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ

DYNAMICS OF DRYING THERMAL INSULATION OF PIPELINES

Щербинин Константин Андреевич, ассистент каф. «Теплоэнергетика и теплотехника», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: scherbiniin.ka@gmail.com, Тел.: +7(903)086-43-65

Муниц Владимир Александрович, д-р. техн. наук, заведующий каф. «Теплоэнергетика и теплотехника», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: v.a.munts@urfu.ru. Тел.: +7(904)170-50-82

Муниц Юлия Георгиевна, канд. техн. наук, доцент каф. «Систем управления энергетикой и промышленными предприятиями», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: Munts@acons.group Тел.: +7(912)286-03-38

Чойнзонов Дмитрий Банзаракцаевич, студент гр. ЭН-350011 каф. «Теплоэнергетика и теплотехника», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: dmi6378@yandex.ru, Тел.: +7(922)19-71-028

Konstantin A. Sherbinin, assistant, Department «Heat power engineering and heat engineering», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: scherbiniin.ka@gmail.com. Ph.: +7(903)086-43-65

Vladimir A. Muntz, Doctor Sc., head of the Department «Heat power engineering and heat engineering», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: v.a.munts@urfu.ru. Ph.: +7(904)170-50-82

Yuliya G. Muntz, Ph.D., Department «Energy management systems and industrial enterprises», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: Munts@acons.group. Ph.: +7(912)286-03-38

Dmitriy B. Choinzonov, student, Department «Heat power engineering and heat engineering», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: dmi6378@yandex.ru. Ph.: +7(922)19-71-028

Аннотация: В работе исследовано распределение температур по толщине изоляции. Рассчитаны координаты выходящей изоляции и тепловой поток в зависимости от времени сушки и теплофизических параметров. Исследовано время сушки тепловой изоляции после осушения канала.

Abstract: The work deals with investigation of the temperature distribution over the thickness of the insulation. Calculated coordinates dry insulation and heat flow as a function of drying time and thermal parameters. We have investigated the drying of thermal insulation after drying channel.

Ключевые слова: центральное теплоснабжение; изоляция; осушение; тепловые потери; затопление.

Key words: central heating; insulation; drying; thermal loss; flooding.

Нормируемая величина удельных тепловых потерь с поверхности изолированного трубопровода имеет место быть только в том случае, когда поры материала наполнены воздухом. В реальных эксплуатационных условиях, возможно проникновение грунтовых вод к поверхности изолирующего слоя или внутренние повреждения системы трубопроводов.

В том случае, когда происходит увлажнение слоя, характеристики теплоизолирующего материала

ухудшаются из-за смены среды-наполнителя пространства пор. Следовательно, при этом изменяется коэффициент теплопроводности тепловой изоляции, отсюда неизбежный рост удельной величины тепловых потерь.

Для анализа процесса сушки теплоизоляционного слоя на трубопроводах тепловых сетей было проведено моделирование изменения глубины просохшего материала, обусловленного движением границы фронта испарения влаги во времени. В данной работе решается

квазистационарная задача теплопроводности для слоя изоляции. В задаче рассматривалось, что в первоначальный момент времени, после осушения канала, тепловая изоляция находится в состоянии полного намокания, а окончание процесса сушки наступает при достижении фронта испарения наружной поверхности изоляции.

Нормируемая величина удельных тепловых потерь с поверхности изолированного трубопровода имеет место быть только в том случае, когда поры материала наполнены воздухом. В реальных эксплуатационных условиях, возможно проникновение грунтовых вод к поверхности изолирующего слоя или внутренние повреждения системы трубопроводов. В том случае, когда происходит увлажнение слоя, характеристики теплоизолирующего материала ухудшаются из-за смены среды-наполнителя пространства пор. Следовательно, при этом изменяется коэффициент теплопроводности тепловой изоляции, отсюда неизбежный рост удельной величины тепловых потерь.

Для анализа процесса сушки теплоизоляционного слоя на трубопроводах тепловых сетей было проведено моделирование изменения глубины просохшего материала, обусловленного движением границы фронта испарения влаги во времени. В данной работе решается квазистационарная задача теплопроводности для слоя изоляции. В задаче рассматривалось, что в первоначальный момент времени, после осушения канала, тепловая изоляция находится в состоянии полного намокания, а окончание процесса сушки наступает при достижении фронта испарения наружной поверхности изоляции.

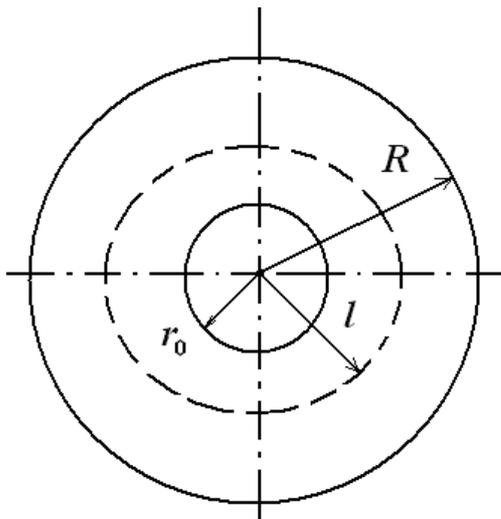


Рис. 1. Схематическое изображение сушки тепловой изоляции. r_0 – радиус трубы, R – радиус тепловой изоляции, ζ – граница осушенной изоляции

Для рассмотрения распределения температур по толщине слоя тепловой изоляции, используем уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dt}{dr} \right) = 0 \quad (1)$$

В зоне высохшей тепловой изоляции, при $r_0 < r < \zeta$ значение коэффициента теплопроводности равно λ_c теплопроводности сухой изоляции, в зоне влажной изоляции при $\zeta < r < R$ коэффициент теплопроводности существенно выше и равен λ_m .

Решение будем искать: для зоны сухой изоляции в виде:

$$t_1 = C_2 + C_1 \cdot \ln r \quad (2)$$

для зоны влажной изоляции:

$$t_2 = K_2 + K_1 \cdot \ln r \quad (3)$$

Постоянные интегрирования определим из граничных условий: при $r = r_0$ температура равна температуре стенки трубы t_c , которая поддерживается постоянной $t_1 = t_c$. На границе сухого и мокрого слоев при $r = \zeta$ температуры равны $t_1 = t_2$. На поверхности изоляции при $r = R$ граничные условия третьего рода $-\lambda \cdot \frac{dt_2}{dr}_{r=R} = \alpha \cdot (t_n - t_n)$. Здесь: α – коэффициент теплоотдачи от поверхности изоляции к окружающей среде, Вт/(м²К); t_n и t_n – температура поверхности изоляции и наружного воздуха, °С. И наконец на поверхности изоляции, при $r = R$ температура t_2 равна температуре поверхности изоляции t_n . Используя данные граничные условия, получим систему из четырех уравнений:

$$\begin{aligned} t_c &= C_2 + C_1 \cdot \ln r_0; \\ C_2 + C_1 \cdot \ln \zeta &= K_2 + K_1 \cdot \ln \zeta; \\ -\lambda_m \cdot \frac{dt_2}{dr}_{r=R} &= \alpha (t_n - t_n); \\ t_n &= K_2 + K_1 \cdot \ln R \end{aligned}$$

Производная:

$$\frac{dt_2}{dr}_{r=R} = \frac{K_1}{R} \text{ или } -\lambda \cdot \frac{K_1}{R} = \alpha (t_n - t_n),$$

$$\text{отсюда } K_1 = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda} (t_n - t_n) = \text{Bi} \cdot (t_n - t_n)$$

Подставляя постоянную интегрирования в (3) при $r = R$, получим:

$$t_n = K_2 + Bi \cdot (t_n - t_n) \ln R$$

или $K_2 = t_n - Bi \cdot (t_n - t_n) \ln R$.

Для зоны сухой изоляции при $r = r_0$ $C_2 = t_c - C_1 \ln r_0$ и для границы раздела сухой и мокрой изоляции при $r = \zeta$ $C_2 = K_2 + (K_1 - C_1) \cdot \ln \zeta$. Отсюда:

$$C_1 = \frac{(t_n - t_c) + Bi \cdot (t_n - t_n) \cdot \ln(R/\zeta)}{\ln(\zeta/r_0)}$$

$$\text{и } C_2 = t_c - \frac{(t_n - t_c) + Bi \cdot (t_n - t_n) \cdot \ln(R/\zeta)}{\ln(\zeta/r_0)} \cdot \ln r_0.$$

Решение уравнений (2) и (3) будут иметь следующий вид:

$$t_1 = t_c + \frac{(t_n - t_c) + Bi \cdot (t_n - t_n) \cdot \ln(R/\zeta)}{\ln(\zeta/r_0)} \cdot \ln(r/r_0)$$

$$t_2 = t_n + Bi \cdot (t_n - t_n) \cdot \ln(R/r).$$

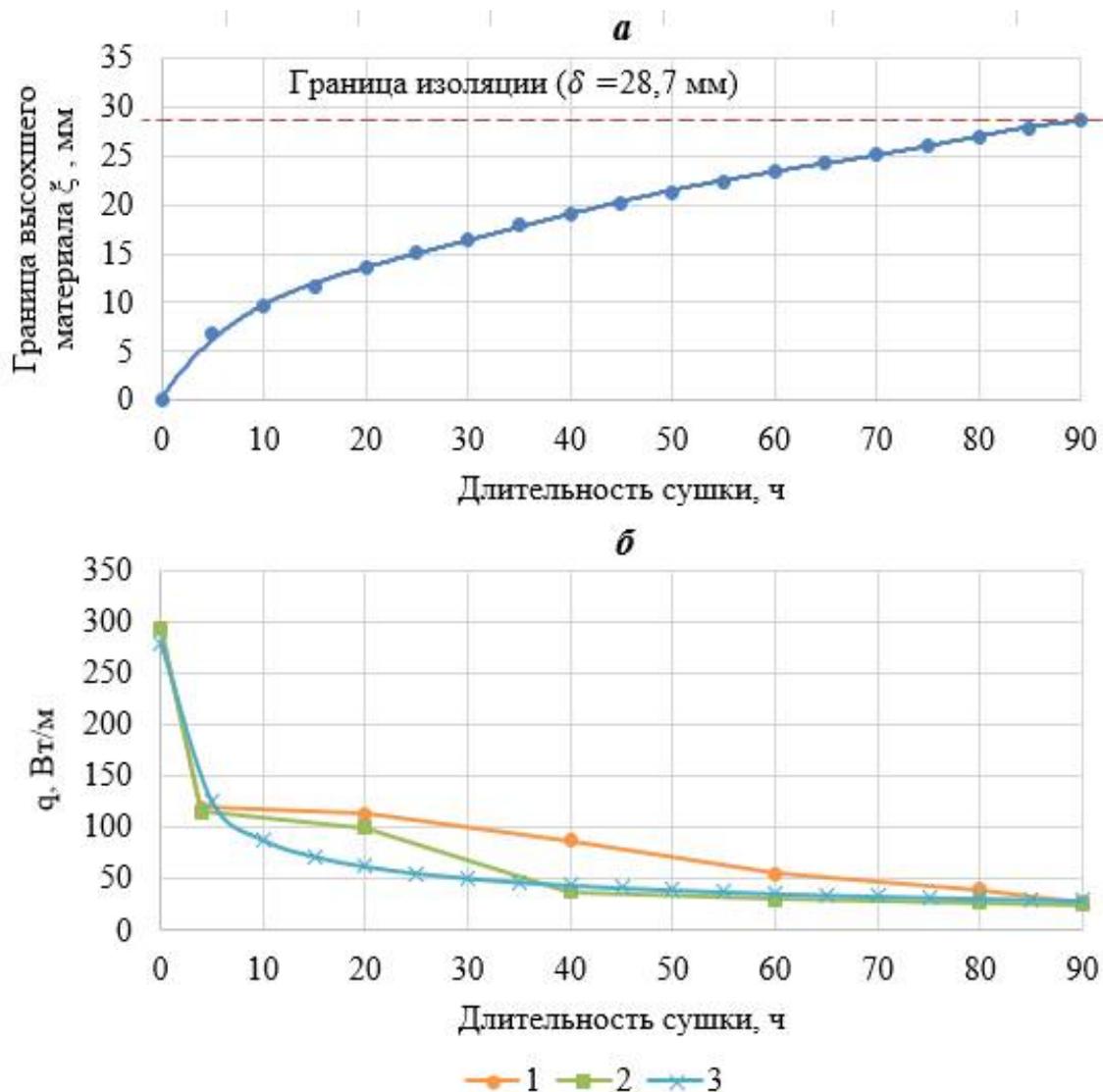


Рис. 2. а – изменение границы высохшего материала в зависимости от времени; б – изменение линейного теплового потока, проходящего через изоляционный слой; 1 – экспериментальные данные при относительной влажности в канале $\varphi = 100\%$; 2 – экспериментальные данные при относительной влажности в канале $\varphi = 40\%$; 3 – расчетные данные по (5).

Неизвестные температуры поверхности изоляции t_n и температуры на границе раздела сухого и мокрого слоев изоляции t_ζ можно определить из уравнений равенства потоков теплоты через изоляцию

$$q_{r=R} = q_{r=\zeta}$$

$$q_{r=R} = 2\pi R \lambda_2 \cdot (t_n - t_n)$$

и $q_{r=\zeta} = 2\pi \lambda_1 \cdot \frac{(t_c - t_\zeta)}{\ln(\zeta/r_0)} = 2\pi \lambda_2 \cdot \frac{(t_\zeta - t_n)}{\ln(R/\zeta)}$.

Решение данной системы позволяет определить температуру поверхности изоляции:

$$t_n = \frac{t_c \cdot \lambda_1 \ln(R/\zeta) + [\lambda_1 \ln(R/\zeta) + \lambda_2 \ln(\zeta/r_0)] \cdot Bi \cdot \ln(R/\zeta) \cdot t_n}{[\lambda_1 \ln(R/\zeta) + \lambda_2 \ln(\zeta/r_0)] \cdot [1 + Bi \cdot \ln(R/\zeta)] - \lambda_2 \cdot \ln(\zeta/r_0)}$$

и температуру на границе раздела

$$t_\zeta = t_n + Bi \cdot (t_n - t_n) \cdot \ln(R/\zeta).$$

Уравнение движения границы высохшей изоляции запишем с условием, что теплота, затрачиваемая на испарение влаги, равна разности потоков теплоты переносимой теплопроводностью. Уравнение примет следующий вид:

$$\rho W \sigma \frac{d\zeta}{d\tau} = -\lambda_1 \frac{dt_1}{dr}_{r=\zeta} + \lambda_2 \frac{dt_2}{dr}_{r=\zeta} \quad (4)$$

где: ρ – плотность материала изоляции, кг/м³; W – массовое содержание влаги, кг_{вл}/кг_{сух}; σ – удельная теплота парообразования, кДж/кг.

Учитывая, что $\frac{dt_1}{dr}_{r=\zeta} = \frac{C_1}{\zeta}$ и $\frac{dt_2}{dr}_{r=\zeta} = \frac{K_1}{\zeta}$, уравнение (4) преобразуется к следующему виду

$$\rho W \sigma \frac{d\zeta}{d\tau} = -\lambda_1 \frac{C_1}{\zeta} + \lambda_2 \frac{K_1}{\zeta} =$$

$$\lambda_1 \cdot \frac{(t_c - t_n) + Bi \cdot (t_n - t_n) \cdot \ln(R/\zeta)}{\zeta \cdot \ln(\zeta/r_0)} + \lambda_2 \cdot \frac{Bi \cdot (t_n - t_n)}{\zeta}$$

или

$$\frac{\zeta d\zeta}{\lambda_1 \cdot \frac{[(t_c - t_n) + Bi \cdot (t_n - t_n) \cdot \ln(R/\zeta)]}{\ln(\zeta/r_0)} + \lambda_2 \cdot Bi \cdot (t_n - t_n)} = \frac{d\tau}{\rho W \sigma} \quad (5)$$

Численное интегрирование выражения (5) позволяет получить изменение границы осушенной зоны в зависимости от времени

На рисунке 2а представлена расчетная зависимость изменения глубины просохшего слоя от времени для минеральной ваты толщиной слоя $\delta = 28,7$ мм, коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0,05$ Вт/(м·К), плотностью $\rho = 11$ кг/м³.

Анализируя график изменения линейного теплового потока в зависимости от времени (рис. 2б), следует заметить, что расчетные и экспериментально полученные данные хорошо сопоставимы.