

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ НАДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Ю.А. Галенко, В.П. Лушев, В.Н. Пузанов

В статье предложен способ совершенствования действующей методики определения тепловых потерь. Получена новая математическая модель потерь тепла и предложена методика ее применения с использованием тепловизора. Приведены результаты расчетов и экспериментов.

Наиболее распространенным методом учета тепловых потерь является учет температуры и расхода теплоносителя на концах контролируемого участка трубы. Однако этот метод не позволяет определить причины потерь и может применяться только при полном оснащении приборами учета всех отводов от трубопровода.

Целью данной работы являлось совершенствование методики определения потерь через теплоизоляцию трубопровода.

Согласно действующей нормативной документации РД 153-34.0-20.523-98 удельные тепловые потери трубопроводов могут определяться по формуле:

$$q = \frac{\pi(t - t_n)}{\frac{\ln(1 + 2\delta/d)}{\lambda_{из}} + \frac{1}{\alpha_n}(d + 2\delta)}, \quad (1)$$

где t и t_n – температура теплоносителя и наружного воздуха, соответственно, °C; d – наружный диаметр трубопровода, м; δ – толщина изоляции, м; $\lambda_{из}$ – коэффициент теплопроводности материала изоляции, Вт/(м²·°C); α_n – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности изоляции к воздуху, Вт/(м²·°C).

Однако при определении коэффициента теплоотдачи возникает существенная неопределенность. Величина α_n может иметь значение от 6 до 29 Вт/(м²·°C) в зависимости от коэффициента излучения внешнего слоя теплоизоляции и скорости ветра, но аналитические выражения для α_n отсутствуют.

Известна зависимость α_n от скорости ветра W и диаметра d трубопровода в виде [1]:

$$A_n = 4,65W^{0,7} / d^{0,3}. \quad (2)$$

Известны также следующие зависимости α_n для двух диапазонов чисел Рейнольдса [2]:

$$Nu = \alpha_n d / \lambda = 0,25 Re^{0,6} Pr^{0,38},$$

если $10^3 < Re < 2 \cdot 10^5$,

$$Nu = 0,23 Re^{0,8} Pr^{0,37},$$

если $3 \cdot 10^5 < Re < 2 \cdot 10^6$, (3)

которые можно аппроксимировать средней зависимостью:

$$\alpha_n = 0,926 Re^{0,7} Pr^{0,38} \lambda / d = k(t_{cp}) W^{0,7} / d^{0,3}, \quad (4)$$

где $k(t_{cp}) = 0,0926 Pr^{0,38} \lambda v^{-7}$ – коэффициент, зависящий от средней температуры; Re , Pr – числа Рейнольдса и Прандтля; λ , v – коэффициенты теплопроводности и кинематической вязкости.

Значения параметров выбираются при средней температуре, определяемой по формуле:

$$t_{cp} = (t_3 + t_n) / 2, \quad (5)$$

где t_3 – температура наружной поверхности трубопровода.

Значение t_3 определяется из равенства тепловых потоков через изоляцию и от поверхности изоляции в окружающий воздух

$$(t - t_3) / R_{из} = (t_3 - t_n) / R_n, \quad (6)$$

где $R_{из} = d \ln(1 + 2\delta/d) / (2\pi\lambda_{из})$ – удельное сопротивление изоляции; $R_n = [\pi\alpha_n(d + 2\delta)]^{-1}$ – удельное сопротивление теплоотдаче.

Разлагая значения λ , v в ряд в точке t_n и производя преобразования с учетом малых изменений параметров в точке t_{cp} , получим:

$$t_{cp} - t_n = (t_3 - t_n) / 2 = (t - t_n) / 2 \cdot [A' - B' \cdot (t - t_n)], \quad (7)$$

где $A' = 1 / (1 + k + R_{из})$;

$B' = \beta \cdot k \cdot R_{из} / 2 / (1 + k + R_{из})^2$; $\beta = 0,7v' / v_n - \lambda' / \lambda_n$; v_n , λ_n – значения v , λ при температуре t_n ; v' , λ' – значения производных v , λ при температуре t_n ;

$$k = v_n^{-0,7} d^{-0,3} 0,926 \pi Pr^{0,38} \lambda_n W^{0,7} (d + 2\delta). \quad (8)$$

Для удельного потока из формулы (1) имеем:

$$q = A(t - t_n)[1 - B(t - t_n)], \quad (9)$$

где $A = k / (1 + k \cdot R_{из})$; $B = -\beta(1 - kR_{из}) / 2 / (1 + k \cdot R_{из})$.

Приравнивая тепловой поток изменению энтальпии теплоносителя, получим дифференциальное уравнение для температуры теплоносителя по длине трубопровода:

$$Gcdt = -A(t - t_n)[1 - B(t - t_n)]dx, \quad (10)$$

где G , c – расход и теплоемкость теплоносителя соответственно.

Интегрируя (10) по x от 0 до ℓ и по t соответственно от t_0 до t_1 , получим:

$$t_1 = t_n + De^{-A\ell/Gc} / [1 + BDe^{-A\ell/Gc}], \quad (11)$$

где $D = (t_0 - t_n) / [1 - B(t_0 - t_n)]$.

Тепловые потери на участке протяженностью ℓ определяются по формуле:

$$Q = Gc(t_1 - t_n) = Gc(t_n - t_0 + De^{A\ell/Gc} / [1 + BDe^{A\ell/Gc}]). \quad (12)$$

Величины A , B , D , входящие в это выражение, могут быть определены достаточно точно, что повышает точность расчета теплопотерь.

По данной модели были оценены тепловые потери для двух вариантов:

а) для участка без теплоизоляции при скорости ветра три метра в секунду,

б) для участка с толщиной изоляции шесть сантиметров при скорости ветра двадцать метров в секунду.

Длина каждого участка двести метров, диаметр трубопровода семьдесят два сантиметра. Расход теплоносителя 1839 тонн в час. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1
Результаты расчета тепловых потерь

$R_{из}$, м·°С/Вт	A , Вт/(м·°С)	$B \cdot 10^{-4}$, 1/°С	D , °С	t , °С	Q , Гкал/ ч
0	27,298	7,1	64,64	53,26	6,004
0,4949	1,989	-6,7	56,69	50,25	0,463

Существенное различие результатов подтверждает возможность реального снижения тепловых потерь путем улучшения изоляции.

На предложенной модели может основываться несколько подходов к определению тепловых потерь. Один из них - предварительный расчет теплового сопротивления изоляции и прогнозирование потерь с учетом выражения (12) и полученных величин $R_{из}$. Преимущества такого способа - оперативность, малые трудозатраты, возможность со-

ставления прогноза потерь. Недостаток - погрешности, вызванные возможными отклонениями сопротивления изоляции от расчетного значения, например, в результате частичного разрушения изоляции, повышенной влажности или различий в качестве теплоизоляционных работ.

Второй подход - постоянный мониторинг качества изоляции по всей длине трубопровода и экспериментальное определение величины $R_{из}$. Такой подход позволяет исключить неопределенность величины $R_{из}$, но требует существенных затрат на создание системы контроля и на проведение измерений.

С целью снижения затрат на определение потерь можно предложить следующую комбинацию «расчетного» и «экспериментального» способов: экспериментально определять среднее сопротивление изоляции на типовом участке трубопровода и эту величину использовать при расчете потерь по предложенной модели.

Определение среднего сопротивления может основываться на формуле (6). Величины t_1 , t_3 и t_n могут быть измерены, величина R_n для данных условий теплообмена постоянна, поэтому отношения сопротивлений изоляции на различных участках трубопровода можно оценить по результатам измерений температур. Таким образом, для экспериментального определения сопротивлений на нескольких участках достаточно, используя датчик теплового потока, оценить удельное сопротивление изоляции на одном из участков, измерить температуру воздуха, температуру трубы под изоляцией на одном из участков и температуру поверхности изоляции всех участков.

Оптимальным средством выполнения таких измерений является тепловизор. Он позволяет не только получить исходные данные для расчета тепловых потерь, но и оперативно снять информацию о состоянии теплоизоляции на достаточно протяженных объектах. В данном случае авторами был использован тепловизор AGA-680.

Характерный вид температурного поля нескольких участков трубопровода приведен на рисунках.

На рис. 1 видны две трубы: «подача» и «обратка». По первой подается горячая вода, по второй возвращается остывшая. Трубы изогнуты. Более горячая труба находится справа. Область измерений на рисунке ограничена двумя вертикальными и двумя горизонтальными прямыми. В данном случае из-

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ НАДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

меряется температура поверхности «обратки».

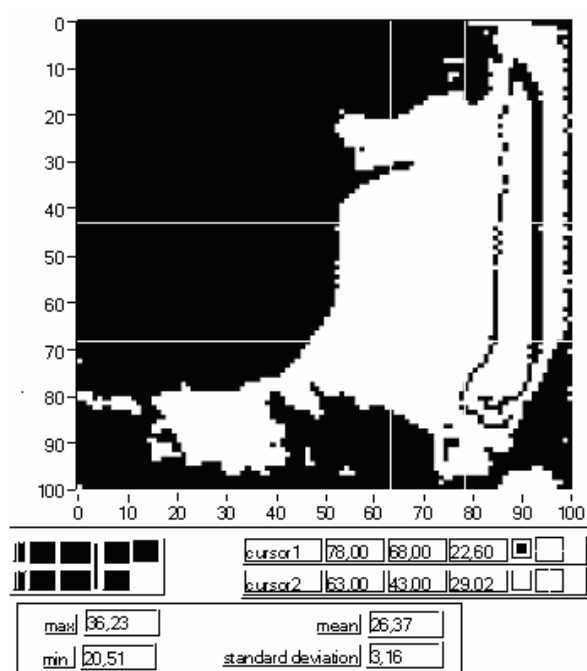


Рисунок 1 – Термограмма трубопровода без теплоизоляции

На рис. 2 приведены графики распределения температуры по горизонтали и вертикали. Труба без изоляции, диаметр около 86 сантиметров, температура воды около 64°C.

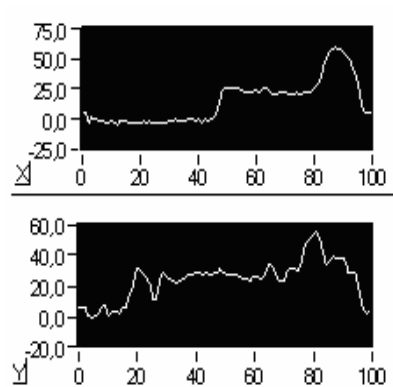


Рисунок 2 – Распределение температуры в области визирования

На рис. 3 изображен участок трубопровода с поврежденной теплоизоляцией. Часть трубы, сливающаяся с фоном, имеет качественную изоляцию. На вертикальном участке теплоизоляция повреждена. Расстояние до места съемки около 75 метров. Хорошо видны различия в качестве изоляции. Удаленность объекта не является препятствием для измерений.

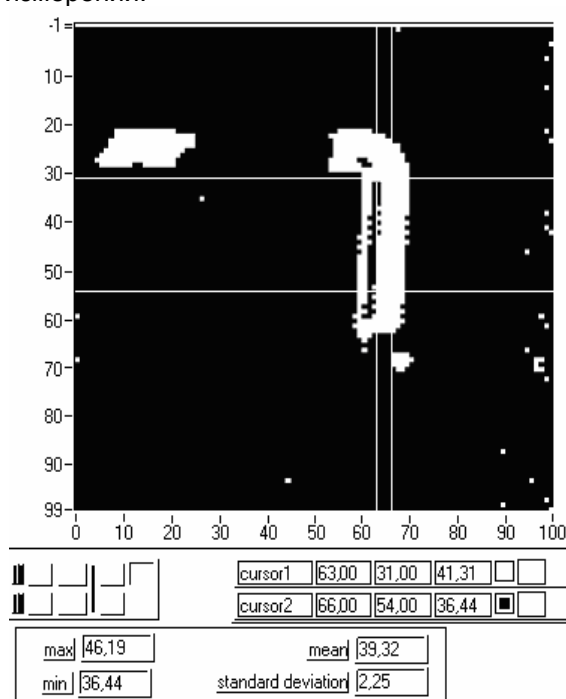


Рисунок 3 – Термограмма трубопровода с поврежденной теплоизоляцией

Характеристики используемого тепловизора позволяют измерять температуру с погрешностью, не превышающей 0,5°C, что достаточно для реализации предложенной авторами методики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М.: Энергия, 1975.
2. Исаченко В.П. и др. Теплопередача. М.: Энергия, 1975.
3. Манюк В.И. и др. Наладка и эксплуатация водяных тепловых сетей. Справочник. М.: Стройиздат, 1988.