5. И в а н о в с к и й И. К., О с и п о в С. Н. Оценка тепло- и массообменных параметров при термическом испытании образцов глины на чувствительность к сушке // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2002. – № 6. – С. 75–89.

6. П е х о в и ч А. И., Ж и д к и х В. М. Расчеты теплового режима твердых тел. – Ленинград: Энергия, 1976. – 352 с.

7. Л ы к о в А. В. Теория теплопроводности. – М.: Высш. шк., 1966. – 600 с.

8. Г р а д ш т е й н И. С., Р ы ж и к И. М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – М.: Наука, 1971. – 1108 с.

9. Л ы к о в А. В. Тепломассообмен: Справ. – М.: Энергия, 1972. – 560 с.

Представлена кафедрой
теплогазоснабжения и вентиляции

Поступила 20.11.2003

УДК 621.186.2.001.24

К ПРИМЕНЕНИЮ МЕТОДА «ТЕПЛОВОЙ ВОЛНЫ» ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Канд. техн. наук, доц. СЕДНИН В. А., докт. физ.-мат. наук МЕЛЕШКО И. Н.

Белорусский национальный технический университет

Системы централизованного теплоснабжения классифицируются как распределенные в пространстве и состоящие из элементов производства и потребления тепловой энергии, объединенных элементами транспорта (тепловые сети) энергии, и элементов преобразования ее параметров (тепловые пункты). Эффективность их работы существенно зависит от правильной дислокации этих элементов, схемы их соединения, степени автоматизации, структуры и состава самих элементов. Проблемы повышения надежности систем теплоснабжения достаточно подробно изложены в [1, 2].

Необходимый элемент систем централизованного теплоснабжения – тепловые сети, транспортные тепловые потери в которых, с одной стороны, являются показателем работы теплопроводов, характеризующим эффективность расходования природных ресурсов и степень воздействия на окружающую среду, а с другой – указывают на техническое состояние самих теплопроводов.

Актуальность определения транспортных потерь теплоты в сетях централизованного теплоснабжения вызвана необходимостью иметь энергетическую характеристику тепловых сетей по тепловым потерям, которая является важным экономическим показателем, предметом заинтересованности всех участников взаиморасчетов при выработке и потреблении тепловой энергии.

Однако из-за большой погрешности измерений транспортные тепловые потери в тепловых сетях не могут определяться просто как разность между теплотой, отпущенной источником теплоснабжения, и тепловой энергией, потребленной всеми абонентами. К примеру, в [2] показано, что относительная погрешность оценки тепловых потерь по измерениям штатных приборов может составлять 50 % и более. При этом нетрудно заметить, что при снижении доли транспортных тепловых потерь погрешность еще больше возрастает. Поэтому, несмотря на данные, полученные с помощью приборов учета тепловой энергии, фактические тепловые потери при транспортировке теплоносителя должны определяться по результатам измерений или испытаний.

Принципиально возможно использование нескольких методов нахождения транспортных потерь теплоты в сети теплоснабжения [2]:

- определение теплотехнических параметров теплоносителя в начале и конце участка теплопровода;
- прямое или косвенное измерение линейной плотности теплового потока от теплопровода;
- нахождение теплотехнических характеристик и термических сопротивлений конструкции теплопроводов.

Все рассмотренные методы, применяемые на практике и отличающиеся по способу определения тепловых потерь, требуют проведения измерений в стационарных условиях, что диктуется двумя основными причинами.

Во-первых, для исключения функционального описания начальных и граничных условий процесса теплообмена и определения теплоинерционных свойств грунта, изоляции и теплопроводов, приводящих к резкому возрастанию погрешности.

Во-вторых, характеризовать теплозащитные свойства конструкции теплопроводов и сами тепловые потери имеет смысл только для стационарных условий. В противном случае линейная плотность теплового потока, помимо зависимости от времени, становится еще и неопределенной вследствие ее зависимости от выбора замкнутого контура, охватывающего подземный теплопровод.

С учетом способа и условий измерений в [2] отмечаются следующие основные недостатки единственной используемой в настоящее время методики [3, 4], вызванные рядом принципиальных причин, которые, в свою очередь, классифицируются по способу измерения, техническим проблемам, возникающим при испытаниях, условиям измерения, а также по дополнительным факторам. Отмеченные в [2] недостатки, с одной стороны, и возрастающая актуальность, практическая значимость достоверного и надежного определения фактических тепловых потерь, с другой, вызывают необходимость совершенствования существующей методики, а также разработки новых.

Ранее [5] было отмечено, что основным источником затруднений при тепловых испытаниях водяных тепловых сетей по нормативным методикам является несоответствие принципа калориметра практическим условиям испытаний. Автор предложил решение этой проблемы на основе обобщения методов определения тепловых потерь в тепловых сетях на общий случай течения жидкости в трубопроводах при неустановившемся температурном режиме, который открывает возможность решения задач, связанных с разработкой поучастковых испытаний, которые присущи методу стационарных испытаний. Рассмотрим основополагающие принципы, предложенные в [5], методики определения тепловых потерь в тепловых сетях.

Для теплопотерь ΔQ на выделенном участке теплопровода можно записать

$$\Delta Q = \rho c_p S w \Delta t_f = \rho c_p S L \frac{\overline{\Delta t_f}}{\tau_f},$$

где ρ – плотность теплоносителя (воды); c_p – удельная массовая изобарная средняя теплоемкость теплоносителя; S – поперечное сечение теплопровода свободное для движения теплоносителя; w – скорость движения теплоносителя, м/с; $\overline{\Delta t_f}$ – среднее значение падения температуры теплоносителя на рассматриваемом участке длиной L; τ_f – отрезок времени перемещения теплоносителя по рассматриваемому участку при движении со средней скоростью.

Основную трудность при определении тепловых потерь составляет оценка величин $\overline{\Delta t_f}$ и τ_f. В основу определения промежутка времени движения жидкости τ_f на выделенном для испытаний участке теплопровода положен принцип температурной полуволны. Его смысл к определению τ_f заключается в том, что эта величина выражается через продолжительность прохождения температурной полуволны τ_v по участку теплопровода

$$\tau_f = f(\tau_v). \qquad (1)$$

Величину τ_v получают экспериментально как разность расстояний между центрами тяжести сходственных полуволн на графиках температур в начальном и конечном сечениях выделенного участка трубопровода.

Уравнение (1) выражает зависимость между продолжительностями прохождения температурной волны и жидкости по рассматриваемому участку трубопровода. Очевидно, что если бы температуры и скорости во всех точках поперечного сечения потока имели одинаковые значения, то температурные полуволны в этих сечениях совпадали бы между собой по форме, а продолжительности движения полуволн и жидкости по участку – по величине, и уравнение (1) перешло бы в этом случае в простое тождество

$$\tau_f = \tau_v.$$

Неоднородность скоростного и температурного полей в действительных условиях течения жидкости приводит к перемешиванию, сопровождающемуся перераспределением температур, что должно отразиться на форме и положении температурных волн в конечном сечении трубопровода, а следовательно, и на продолжительности перемещения температурной волны по участку теплопровода, обусловливая некоторое отклонение τ_v от τ_f.

Также на форму и положение температурной полуволны должен оказывать влияние теплообмен между жидкостью и стенками трубопровода при нестационарном температурном режиме. При возрастании температуры теплоносителя, поступающего на участок, температура в конечном сечении участка будет отставать от температуры в начальном сечении в связи с частичной аккумуляцией теплоты в стенках труб при их нагревании. И, наоборот, при понижении температуры жидкости, поступающей на участок, температура жидкости в конечном сечении участка будет опережать температуру в начальном сечении по причине теплоотдачи от стенок трубы теплоносителю, ранее аккумулированной ими теплоты. Отмеченное обстоятельство должно вызвать еще большее отклонение τ_v от τ_f.

На основании сказанного соотношение (1) выражают в виде

$$\tau_f = \tau_v - \delta\tau_v,$$

где $\delta\tau_v$ – поправка, выражающая отклонение продолжительности перемещения температурной полуволны от продолжительности перемещения жидкости, обусловленное совместным влиянием факторов «перемешивания» и «аккумуляции» на форму и положение температурной полуволны в конечном сечении потока.

В основу определения $\overline{\Delta t_f}$ положен принцип «полной тепловой волны». Величина $\overline{\Delta t_f}$ выражается через падение средней температуры волны $\overline{\Delta t_v}$ на участке трубопровода

$$\overline{\Delta t_f} = f\left(\overline{\Delta t_v}\right). \qquad (2)$$

Величину $\overline{\Delta t_v}$ получают экспериментально как разность средних температур сходственных волн на графиках температур в начальном и конечном сечениях трубопровода.

На основании соображений, аналогичных тем, которые были приведены при рассмотрении (1), можно заключить, что при отсутствии действия факторов «перемешивания» и «аккумуляции» величины $\overline{\Delta t_f}$ и $\overline{\Delta t_v}$ совпадают между собой и уравнение (2) переходит в тождество

$$\overline{\Delta t_f} = \overline{\Delta t_v}.$$

Так как действие факторов «перемешивания» и «аккумуляции» обусловит отклонение $\overline{\Delta t_v}$ от $\overline{\Delta t_f}$, обозначим это отклонение через $\delta\overline{\Delta t_v}$ и представим соотношение (2) в виде

$$\overline{\Delta t_f} = \overline{\Delta t_v} + \delta\overline{\Delta t_v}.$$

В [5] рассмотрены теоретические и экспериментальные аспекты использования указанной методики для расчета тепловых потерь на отдельных участках теплопроводов. Предложены аналитические и аналитико-графические подходы для обрабоки результатов эксперимента. Развитие и внедрение в производство систем автоматизированного управления технологическими процессами теплоснабжения позволили использовать метод «тепловой волны» не только для периодических испытаний тепловых сетей, но и диагностики теплопроводов в режиме их эксплуатации. В этой связи возникает необходимость развития математического обеспечения обработки результатов измерений.

Рассмотрим возможность применения для этого аппарата тригонометрического интерполирования [7, 8] и метода гармонического анализа [9]. Во многих проблемах прикладного анализа исходная функция исследуется на конечном интервале $[0, l]$. В таких задачах важное значение имеет тот факт, что аппроксимирующий ряд должен хорошо сходиться. Для этого необходимо, чтобы функция и первая производная принимали (каждая) одинаковые значения в начале и конце выбранного интервала. Так как это условие обычно не выполняется, этот интервал не может быть выбран в качестве полного периода гармонического разложения.

В соответствии с методологией метода «тепловой волны» введем в рассмотрение две функции зависимости температуры от времени $f = f(\tau)$ и $q = q(\tau)$ соответственно на входе и выходе из контрольного участка.

Далее вычтем из исходной функции входа $f(\tau)$ линейную функцию $\alpha\tau + \beta$ и будем оперировать с функцией

$$\varphi(\tau) = f(\tau) - (\alpha\tau + \beta),$$

где коэффициенты α и β определяются из условий:

$$\varphi(0) = 0, \quad \varphi(l) = 0.$$

В результате имеем:

$$\alpha = \frac{f(l) - f(0)}{l}; \quad \beta = f(0); \quad \varphi(\tau) = f(\tau) - \frac{f(l) - f(0)}{l}\tau - f(0). \tag{3}$$

Если теперь продолжить $\varphi(\tau)$ как нечетную функцию $\varphi(-\tau) = -\varphi(\tau)$ на промежуток $[-l, 0]$ и рассматривать $2l$ как полный интервал гармонического разложения, то будет обеспечена непрерывность функции $\varphi(\tau)$ и ее первой производной на концах промежутка $[-l, l]$, так как

$$\varphi(-l) = \varphi(l) = 0; \quad \varphi'(-l) = \varphi'(l). \tag{4}$$

Теперь целесообразно для функции $\varphi(\tau)$ применить интерполяцию синусами [7]

$$\varphi(\tau) \approx \sum_{k=1}^{n-1} b_k \sin k\frac{\pi}{l}\tau. \tag{5}$$

Здесь коэффициенты b_k определяются формулами тригонометрической интерполяции синусами

$$b_k = \frac{2}{n}\sum_{m=1}^{n-1} \varphi(mh)\sin(kmh), \quad k = 1, 2, \ldots, n-1, \tag{6}$$

где согласно формуле (3):

$$\varphi(mh)=f(mh)-\frac{f(l)-f(0)}{l}mh-f(0), \quad h=\frac{l}{n}, \tag{7}$$

а $f(mh)$ – значения отсчетов прибора для промежутка времени [0, l] на входе.

Аналогично вместо функции выхода $q=q(\tau)$ будем оперировать с функцией

$$q^*(\tau)=q(\tau)-(\alpha^*\tau+\beta^*), \tag{8}$$

где

$$\alpha^*=\frac{q(l)-q(0)}{l}; \quad \beta^*=q(0).$$

Запишем выражения для этой функции, аналогичные формулам (5)...(7)

$$q^*(\tau)\approx\sum_{k=1}^{n-1}b_k^*\sin k\frac{\pi}{l}\tau, \tag{9}$$

где

$$b_k^*=\frac{2}{n}\sum_{m=1}^{n-1}q^*(mh)\sin(kmh), \quad k=1, 2, \ldots, n-1; \tag{10}$$

$$q^*(mh)=q(mh)-\alpha^*mh-b^*, \tag{11}$$

где $q(mh)$ – значения отсчетов прибора для промежутка времени [0, l] на выходе.

Сходимость процесса тригонометрической интерполяции синусами по (9) будет обеспечена, так как выполняется условие:

$$q(-l)=q(l)=0; \quad q'(-l)=q'(l). \tag{12}$$

Интегрируя приближенные формулы (5) и (12), получим соответственно равенства

$$\begin{gathered}F(\tau^*)=\int_0^{\tau^*}\varphi(\tau)d\tau\approx\int_0^{\tau^*}\sum_{k=1}^{n-1}b_k\sin(k\frac{\pi}{l}\tau)d\tau= \\ =\sum_{k=1}^{n-1}b_k\int_0^{\tau^*}\sin(k\frac{\pi}{l}\tau)d\tau=\frac{l}{\pi}\sum_{k=1}^{n-1}\frac{b_k}{k}\left(1-\cos(k\frac{\pi}{l}\tau^*)\right);\end{gathered} \tag{13}$$

$$\begin{gathered}G(\tau^*)=\int_0^{\tau^*}q^*(\tau)d\tau\approx\int_0^{\tau^*}\sum_{k=1}^{n-1}b_k^*\sin(k\frac{\pi}{l}\tau)d\tau= \\ =\sum_{k=1}^{n-1}b_k^*\int_0^{\tau^*}\sin(k\frac{\pi}{l}\tau)d\tau=\frac{l}{\pi}\sum_{k=1}^{n-1}\frac{b_k^*}{k}\left(1-\cos(k\frac{\pi}{l}\tau^*)\right).\end{gathered} \tag{14}$$

Выражения (13) и (14) можно применять для вычисления площадей под кривыми сигналов входа ($f=f(\tau)$) и выхода ($q=q(\tau)$) для промежутка времени [0, τ^*].

Для вычисления площадей под кривыми сигналов на всем интервале [0, l] положим в зависимостях (6) и (7) $\tau^* = l$. Тогда соответственно (13) и (14) перепишутся:

$$F(l) = \int_0^l \varphi(\tau)d\tau \approx \frac{l}{\pi}\sum_{k=1}^{n-1}\frac{b_k}{k}(1-\cos(k\pi)) =$$
$$= \frac{l}{\pi}\sum_{k=1}^{n-1}\frac{b_k}{k}\left(1-(-1)^k\right) = \frac{2l}{\pi}\sum_{m=1}^{n/2}\frac{b_{2m-1}}{2m-1}; \tag{15}$$

$$G(l) = \int_0^l q^*(\tau)d\tau \approx \frac{l}{\pi}\sum_{k=1}^{n-1}\frac{b_k^*}{k}(1-\cos(k\pi)) =$$
$$= \frac{l}{\pi}\sum_{k=1}^{n-1}\frac{b_k^*}{k}\left(1-(-1)^k\right) = \frac{2l}{\pi}\sum_{m=1}^{n/2}\frac{b_{2m-1}^*}{2m-1}. \tag{16}$$

Зависимости (13)...(16) легко реализовать численно. Проведем исследование этих формул на устойчивость по начальным данным.

Пусть $f(mh)$ есть точное значение отсчетов, $\tilde{f}(mh)$ их приближенные значения. Введем обозначения $\varepsilon_m = f(mh) - \tilde{f}(mh)$ и $\varepsilon = \max\limits_m|\varepsilon_m|$ и проследим накопление вычислительной погрешности при использовании (13).

Очевидно, что для значений $\varphi(mh)$, определенных ранее, выполняется неравенство $|\varphi(mh) - \tilde{\varphi}(mh)| = |\varepsilon_m| \le \varepsilon$, $m = 1, 2, \ldots, n-1$.

В итоге будем иметь дело с функцией

$$\tilde{F}(\tau^*) = \frac{l}{\pi}\sum_{k=1}^{n-1}\frac{\tilde{b}_k}{k}\left(1-\cos(k\frac{\pi}{l}\tau^*)\right), \tag{17}$$

где

$$\tilde{b}_k^* = \frac{2}{n}\sum_{m=1}^{n-1}\tilde{\varphi}(mh)\sin(kmh), \quad k = 1, 2, \ldots, n-1.$$

Для модуля разности $F(\tau) - \tilde{F}(\tau^*)$ записываем соотношение

$$\left|F(\tau) - \tilde{F}(\tau^*)\right| = \frac{l}{\pi}\left|\sum_{k=1}^{n-1}\frac{b_k - \tilde{b}_k}{k}\left(1-\cos(k\frac{\pi}{l}\tau^*)\right)\right| \le$$
$$\le \frac{l}{\pi}\sum_{k=1}^{n-1}\frac{\left|b_k - \tilde{b}_k\right|}{k} = \frac{2l}{\pi n}\sum_{k=1}^{n-1}\frac{1}{k}\sum_{m=1}^{n-1}\varepsilon_m\sin(kmh) \le \frac{2l(n-1)}{\pi n}\left(\sum_{k=1}^{n-1}\frac{1}{k}\right)\varepsilon.$$

Окончательно имеем

$$\left|F(\tau) - \tilde{F}(\tau^*)\right| \le \frac{2l(n-1)}{\pi n}H_{n-1}\varepsilon, \tag{18}$$

где H_{n-1} – частичная сумма гармонического ряда $\sum\limits_{k=1}^{\infty}\frac{1}{k}$.

Исследованием и подсчетом сумм такого вида занимался Л. Эйлер [10]. Обозначив через γ_n некоторую бесконечную малую $(\lim\limits_{n\to\infty}\gamma_n = 0)$, запишем формулу

$$H_{n-1} = \ln(n-1) + C + \gamma_n. \qquad (19)$$

Формула (19) показывает, что при возрастании n-частичная сумма H_n гармонического ряда растет, как $\ln n$. Постоянную C в (19) называют постоянной Эйлера. Вычислено [10]

$$C = 0{,}577215...66490... < 0{,}58.$$

Важно отметить также, что H_n с возрастанием n растет очень медленно. В [10] также вычислено:

$$H_{1000} = 7{,}48...; \qquad H_{1000000} = 14{,}39....$$

Усиливая неравенство (18), оценку модуля разности $\left|F(\tau) - \widetilde{F}(\tau^*)\right|$ можно упростить

$$\left|F(\tau) - \widetilde{F}(\tau^*)\right| < \frac{2l}{\pi} H_{n-1}\varepsilon. \qquad (20)$$

Очень важным для практики является то обстоятельство, что правые части неравенств не зависят от τ^*, а зависит только от числа слагаемых n.

Аналогично можно исследовать на устойчивость по начальным данным приближенные формулы (14), (16).

Такой способ оценки приближений можно применить также для оценки разности площадей под кривыми сигналов на входе и выходе

$$G(\tau^*) - F(\tau^*) = \frac{2l}{\pi n} \sum_{k=1}^{n-1} \frac{1}{k} \sum_{m=1}^{n-1} \delta_m \sin(kmh),$$

где

$$\delta_m = q(mh) - f(mh).$$

Пусть $\max|\delta_m| = \delta$. Тогда

$$\left|G(\tau^*) - F(\tau^*)\right| \le \frac{2l(n-1)}{\pi n} H_{n-1}\delta.$$

Или

$$\left|G(\tau^*) - F(\tau^*)\right| < \frac{2l}{\pi} H_{n-1}\delta,$$

где H_{n-1} определено формулой (19).

Приведенные зависимости позволяют обрабатывать сигналы тепловой волны любой формы и таким образом использовать для диагностики тепловой сети колебания температуры теплоносителя, возникающие при эксплуатации тепловой сети или специально задаваемые. В состав программного обеспечения АСУ ТП района теплоснабжения вводится программный модуль, который периодически выполняет расчеты по измеренным данным. Анализ этих статистических данных позволяет оценить состояние тепловой изоляции теплопроводов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ионин А. А. Надежность систем тепловых сетей. – М.: Стройиздат, 1989. – 302 с.
2. Шишкин А. В. Определение потерь тепла в сетях централизованного теплоснабжения // Теплоэнергетика. – 2003. – № 9. – С. 68–74.
3. Методические указания по определению тепловых потерь в водяных тепловых сетях: РД 34.09.255–97. – М.: СПО ОРГРЭС, 1998.
4. Методические указания по составлению энергетических характеристик для систем транспорта тепловой энергии: В 3 ч.: РД 153–34.0–20.523–98. – М.: СПО ОРГРЭС, 1999.
5. Методические указания по определению тепловых потерь в водяных и паровых тепловых сетях: МУ 34–70–080–84. – М.: СПО Союзтехэнерго, 1985.
6. Левкович В. В. Потери тепла водяными сетями при неустановившемся режиме. – Мн.: РИО БПИ, 1960.
7. Турецкий А. Х. Теория интерполирования в задачах. – Мн.: Вышэйш. шк., 1977. – Ч. 2. – 256 с.
8. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. – М.: Наука, 1970. – Т. 3. – 656 с.
9. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. – М.: Физматгиз, 1961. – 524 с.
10. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. – М.: Наука, 1970. – Т. 2. – 800 с.

Представлена кафедрой ПТЭ и ТТ — Поступила 29.01.2004

УДК 620.97

К ВОПРОСУ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НВИЭ ПРИ РЕАБИЛИТАЦИИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ РАДИОНУКЛИДАМИ ТЕРРИТОРИЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Канд. техн. наук, доц. ЛОСЮК Ю. А., студ. ЗАБОРОВСКИЙ А. М.

Белорусский национальный технический университет

Территория радиоактивного загрязнения Республики Беларусь составляет около 40 тыс. кв. км. Необходимость ее реабилитации очевидна. Сегодня нет устоявшегося определения понятия «реабилитация территорий». Мы же, принимая классификацию, предложенную в [1], под реабилитацией территорий понимаем процесс совершенствования условий проживания населения и ведения хозяйственной деятельности на загрязненной радионуклидами территории с целью получения нормативно чистой продукции. Нестандартность, неоднозначность и комплексность проблемы, необходимость учета социальных, психологических, демографических, экономических и других факторов предопределяют отсутствие единых критериев