

Литература

1. Chandrasekhar, S. Hydrodynamic and hydromagnetic stability / S. Chandrasekhar. – Oxford University Press, 1970. – 657 p.
2. Неклюдов, И. М. Описание ленгмюровских циркуляций упорядоченным набором конвективных кубических ячеек / И. М. Неклюдов, Б. В. Борц, В. И. Ткаченко // Прикл. гидромеханика. – Т. 14(86), № 2, 2012. – С. 29–40.
3. Шука, А. А. Нанoeлектроника / А. А. Шука. – М.: Физматкнига, 2007. – 464 с.
4. Сажин, Б. С. Сушка и промывка текстильных материалов: теория, расчет процессов / Б. С. Сажин, В. А. Реутский. – М.: Легпромбытиздат, 1990. – 224 с.
5. Мюллер, Г. Выращивание кристаллов из расплава. Конвекция и неоднородности / Г. Мюллер; [пер. с англ. В. Бунэ]. – М.: Мир, 1991. – 143 с.
6. Рыкалин, Н. Н. Лазерная обработка материалов / Н. Н. Рыкалин, А. А. Углов, А. Н. Кокора. – М.: Машиностроение, 1975. – 296 с.
7. Гершуни, Г. З. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости / Г. З. Гершуни, Е. М. Жуховицкий. – М.: Наука, 1972. – 393 с.
8. Strutt, J. W. (Lord Rayleigh) / On convection currents in a horizontal layer of fluid when the higher temperature is on the under side // J. W. Strutt (Lord Rayleigh). – Phil. Mag. – 1916. – Vol. 32. – P. 529–546.
9. Experimental study of liquid movement in free elementary convective cells / L. Bozbiei, B. Borts, Y. Kazarinov, A. Kostikov, V. Tkachenko // Energetika. – 2015. – Vol. 61, № 2. – P. 45–56.
10. Patochkina, O. L. Elementary convection cell in the horizontal layer of viscous incompressible liquid with rigid and mixed boundary conditions / O. L. Patochkina, B. V. Borts, V. I. Tkachenko // East-European J. Phys. – 2015. – Vol. 2, № 1. – P. 23–31.
11. Bozbej, L. S. Elementary convective cell in the layer of incompressible, viscous liquid and its physical properties / L. S. Bozbej, A. O. Kostikov, V. I. Tkachenko // Mode conversion, coherent structures and turbulence: Intern. conf. MSS-14. – Space Research Institute, Moscow, 2014. – P. 322–328.

Поступила в редакцию 09.02.17

О. С. Цаканян,
канд. техн. наук
В. Н. Голощапов,
канд. техн. наук
С. В. Кошель,
канд. техн. наук
Н. Г. Ганжа

Институт проблем
машиностроения
им. А. Н. Подгорного
НАН Украины, г. Харьков,
e-mail: tsakoleg@rambler.ru

Ключові слова: теплові втрати, вимірювання, еталон, трубопровод.

УДК 53.084;536.628.1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ УЧАСТКОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТЕПЛОПРОВОДОВ МЕТОДОМ ЭТАЛОНА

Розроблено методикку вимірювань і конструкцію вимірювального приладу для визначення рівня теплових втрат на будь-якій ділянці трубопроводів незалежно від типу теплової ізоляції. Прилад являє собою встановлений на трубу корпус з екранами на внутрішніх поверхнях і отворами знизу та зверху для датчиків вимірювання температури й потоку повітря, якими визначаються теплові втрати в навколишнє середовище. Попередньо прилад градується в лабораторних умовах із застосуванням еталона теплової потужності, в якому вона рівномірно розподілена поверхнею ділянки, що містить трубопровід. Еталон являє собою модель ділянки трубопроводу, що містить нагрівач та інтегральний датчик температури. Змінюючи діаметр отвору в торцевих кришках приладу, його можна застосовувати для вимірювання теплових втрат трубопроводів різного діаметра.

Введение

На сегодняшний день десятки тысяч километров теплопроводов эксплуатируются с изношенной или пришедшей в негодность теплоизоляцией. До 20% тепловой энергии теряется в окружающую среду. Качественная теплоизоляция позволяет минимизировать тепловые потери, которые рас-

сеиваются нагретым трубопроводом в окружающее пространство естественной конвекцией и лучистым теплообменом. Поэтому важной задачей в настоящее время является контроль уровня тепловых потерь в трубопроводах во время их эксплуатации. Контроль заключается в измерении тепловых потерь с необходимой точностью.

Толщина слоя покрытия и теплопроводность его материала, а также условия теплообмена с окружающей средой определяют уровень тепловых потерь в конкретных условиях эксплуатации.

В качестве теплоизоляционных материалов, применяемых для тепловых сетей, часто используются пенополиуретановая изоляция, изоляция на основе минеральной ваты с алюминиевой фольгой или окрашенной стеклотканью, а также термоласки.

Обзор существующих методик определения тепловых потерь

Для расчета теплотерь нагретых трубопроводов наиболее широко используется методика, приведенная в [1]. Этот СНиП до сих пор актуален в Украине, хотя написан более 25 лет назад. С тех пор поменялись температурные графики, появились новые материалы, характеристики которых там не приведены. В свою очередь, далеко не все производители современных теплоизоляционных материалов представляют реальные характеристики своей продукции, а многие и вовсе занимаются обманом, желая привлечь как можно больше клиентов. Такая ситуация возможна потому, что проверка теплопроводности материала является сугубо добровольным делом.

Существующая методика определения теплотерь трубопроводов [1] основана на измерении входной и выходной температур и расхода теплоносителя в замкнутой тепловой магистрали при отключенных потребителях. Она имеет следующие недостатки:

- уровень тепловых потерь определяется летом и зимой с различной погрешностью;
- зимой, когда теплотери максимальны, проверить их уровень невозможно потому, что всех потребителей нельзя отключить от тепловой сети;
- любое отклонение температурного графика от нормированных расчетных величин привносит в расчетное определение тепловых потерь большие погрешности, а обеспечить необходимый температурный напор достаточно сложно;
- результаты испытаний при определении теплотерь усредняются, поэтому если какие-либо участки теплотрассы имеют изоляцию другого типа, это может привести большую погрешность.

Если разделить тепловую магистраль на участки, можно определить теплотери на каждом выделенном участке теплотрассы без отключения абонентов [2]. Однако такое определение очень трудоемко и требует применения высокоточных приборов.

Существуют контактные способы определения теплового потока через слой теплоизолирующего покрытия. Однако они неприменимы, если покрытие обладает малой теплопроводностью – установка на поверхность датчика теплового потока (например ИТП-6) искажает условия теплообмена контролируемого участка с окружающей средой. Так как поверхности трубопроводов имеют цилиндрическую форму, то трудно обеспечить как нормальный тепловой контакт, так и учесть распределение коэффициента теплоотдачи по окружности при разных режимах их эксплуатации.

Бесконтактные методы определения тепловых потерь позволяют измерять только лучистую составляющую теплового потока, при этом конвективная часть остается неизмеряемой, несмотря на то, что она может превышать половину тепловых потерь в измеряемом сечении трубопровода.

Анализ известных методов определения тепловых потерь с поверхности трубопроводов показал, что необходимо разработать методику и устройство для определения тепловых потерь на конкретном участке теплоизолированного трубопровода цилиндрической формы, в котором течет горячий теплоноситель. Это позволит определить эффективность того или иного теплоизоляционного материала в реальных условиях эксплуатации трубопровода.

Обоснование использования метода эталона для измерения тепловых потерь с поверхности трубопроводов тепловых сетей

Обеспечить контакт с поверхностью нагретого тела возможно за счет воздушной среды, плавно омывающей нагретое тело, а лучистой составляющей теплового потока, исходящей от тела, нагреть окружающие тела, например экраны, в идеале – до температуры источника тепла, что приведет систему в равновесно состояние. Экраны должны иметь малую теплоемкость. В этом случае теп-

ловая энергия с помощью конвекции передается воздуху. Именно такой принцип работы имеет разработанное устройство.

Для того чтобы измерить энергию воздуха, необходимо воздух, омывающий тело и экраны, заключить в разомкнутый вертикально ориентированный канал, стенки которого являются экранами. Это позволит обеспечить устойчивую структуру течения воздуха. Подымающийся теплый воздух по каналу нагревается от поверхностей теплопровода и экранов. Таким образом, практически вся рассеиваемая теплопроводом энергия преобразуется в тепловую мощность воздуха, транспортируемого через канал, который с целью уменьшения тепловых потерь заключен в хорошо теплоизолированный корпус. При хорошей теплоизоляции в качестве температуры окружающей среды бралась средняя температура транспортируемого воздуха через канал, которая из условия теплоизоляции должна равняться средней температуре окружающих трубу экранов.

Для того чтобы изучить процессы теплообмена, происходящие в воздушном канале, который охватывает участок цилиндрической трубы, следует воспользоваться методом эталона. В данном случае он заключается в получении теплофизических зависимостей, характеризующих тепловые потери для участка теплопровода, который заменяется на цилиндрическую трубу. Она имеет аналогичные геометрические размеры с теплопроводом и оснащена поверхностным источником теплоты и интегрирующим термометром сопротивления. Задавая различную тепловую мощность, можно получить эталонные тепловые характеристики: температурного напора от мощности и коэффициента теплоотдачи. Путем их сопоставления с результатами натурных измерений температуры воздуха на входе и выходе из канала, расхода воздуха и средней температуры поверхности теплопровода можно определить фактические тепловые потери с поверхности теплопровода.

Конструкция эталонного участка трубы

Эталонный участок теплопровода представлял собой цилиндр с внешним диаметром 630 мм и длиной 350 мм, изготовленный из электротехнического картона толщиной 4 мм.

На наружную цилиндрическую поверхность трубы вплотную виток к витку был намотан константановый провод в кремнеземной оплетке, пропитанной высокотемпературным лаком. Чтобы изготовить электрический нагреватель, к цилиндрической поверхности трубы провод фиксировался силиконовым клеем. В образовавшиеся желобки между витками электронагревателя был намотан медный провод диаметром 0,2 мм (провод защищен электроизоляционным лаком), зафиксированный силиконовым клеем. Медный провод выполнял функции термометра сопротивления и служил для измерения температуры поверхности трубы. Электронагреватель запитывался регулируемым источником постоянного тока. Электрическая мощность нагревателя измерялась с помощью двух мультиметров и определялась как произведение падения напряжения на нагревателе на величину электрического тока, проходящего через него.

Конструкция устройства для измерения тепловых потерь теплопроводов

Устройство представляет сборную конструкцию в виде теплоизолированного вертикального канала, состоящего из двух симметричных частей (рис. 1).

Вертикальные стенки корпуса канала являются несущими. Стенки 1 и 10 – глухие, а торцевые стенки 2 и 9 имеют отверстия диаметром 630 мм. Стенка представляет собой четырехслойную клееную панель, заключенную в деревянный каркас. Внешний слой толщиной 3 мм – электротехнический картон, слой 2 толщиной 20 мм – пенопласт, слой 3 толщиной 3 мм – электротехнический картон, слой 4 – фольгированный стеклотекстолит толщиной 0,5 мм.

Внутренние стенки 3, 7, 12, 15, формирующие экраны, представляют собой деревянные рамки из реек сечением 10×20 мм, скрепленные пластинами из фольгированного стеклотекстолита с обеих сторон, между которыми размещен пенопласт толщиной 20 мм. Экраны формируют канал таким образом, что его сечение по высоте изменяется незначительно. В районе половинной высоты канала с обеих сторон установлены экраны 11. Внизу и вверху канала в районе его оси симметрии также установлены экраны 8 и 13, защищающие от излучения проволочные термометры сопротивления 6 и 14. В верхней части устройства расположен сужающийся (с коэффициентом сжатия 3) сверху измерительный теплоизолированный канал 6, в котором установлен проволочный термометр сопротивления

с равномерно размещенным проводом с шагом 15 мм в сечении канала. В самой верхней части измерительного канала установлен крыльчатый анемометр 5, имеющий чувствительность 0,01 м/с.

Для того чтобы не было опускных течений вдоль стенок измерительного канала, он выполнен в виде усеченной пирамиды с изолированными стенками. Это конструктивное решение позволяет получить равномерное распределение скорости воздуха в сечении канала, а также увеличить скорость воздушного потока и тем самым повысить точность ее измерения.

В самой нижней части устройства находится забор холодного воздуха. Здесь же установлен проволочный термометр сопротивления 14 для измерения температуры входного воздуха, поступающего в устройство.

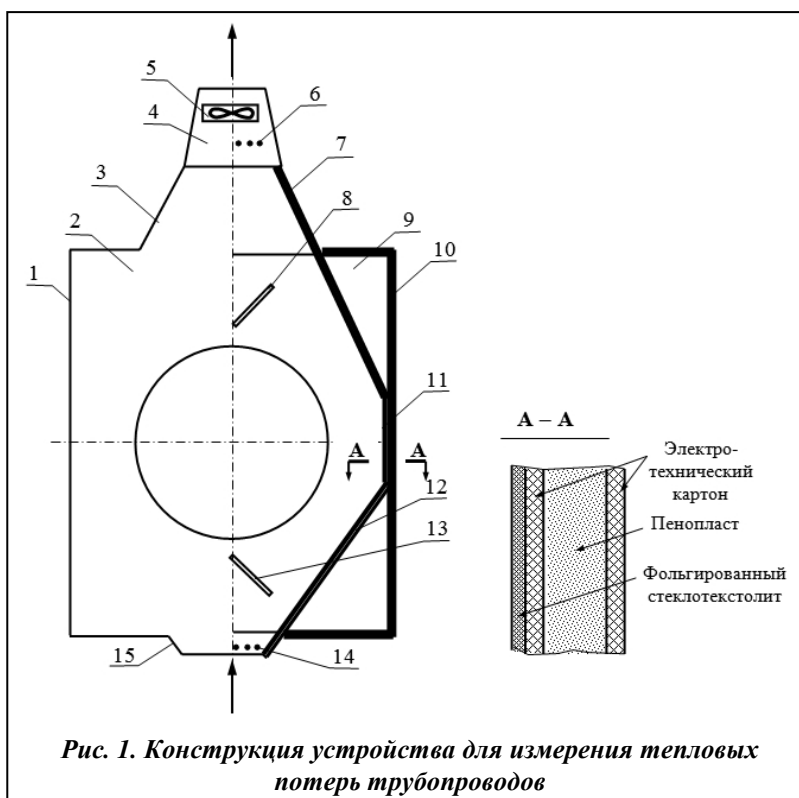


Рис. 1. Конструкция устройства для измерения тепловых потерь трубопроводов

При проведении натурных измерений на цилиндрическую поверхность трубопровода наматывается проволочный термометр сопротивления по технологии изготовления, описанной для эталона. Это позволяет наиболее точно определить интегральную температуру по периметру трубы.

Методика определения эталонных тепловых характеристик устройства

1. В устройство устанавливается эталонный участок трубы.
2. задается электрическая мощность $N_{эл}$ нагревателя с помощью регулирования напряжения на источнике питания постоянного тока.
3. Проводится непрерывное измерение температур воздуха входа ($t_B^{вх}$) и выхода ($t_B^{вых}$) и температуры поверхности эталона (t_n), а также массовой скорости воздушного потока (W) до их установления, т.е. выхода в стационарный режим теплообмена.
4. Результаты измерений фиксируются и по ним вычисляются тепловые потери с наружной поверхности трубопровода

$$N_T = FW \cdot c_p (t_B^{вых} - t_B^{вх})$$

и усредненный коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_n = \frac{N_T}{\pi l \cdot d \left(t_n - \frac{t_B^{вых} + t_B^{вх}}{2} \right)},$$

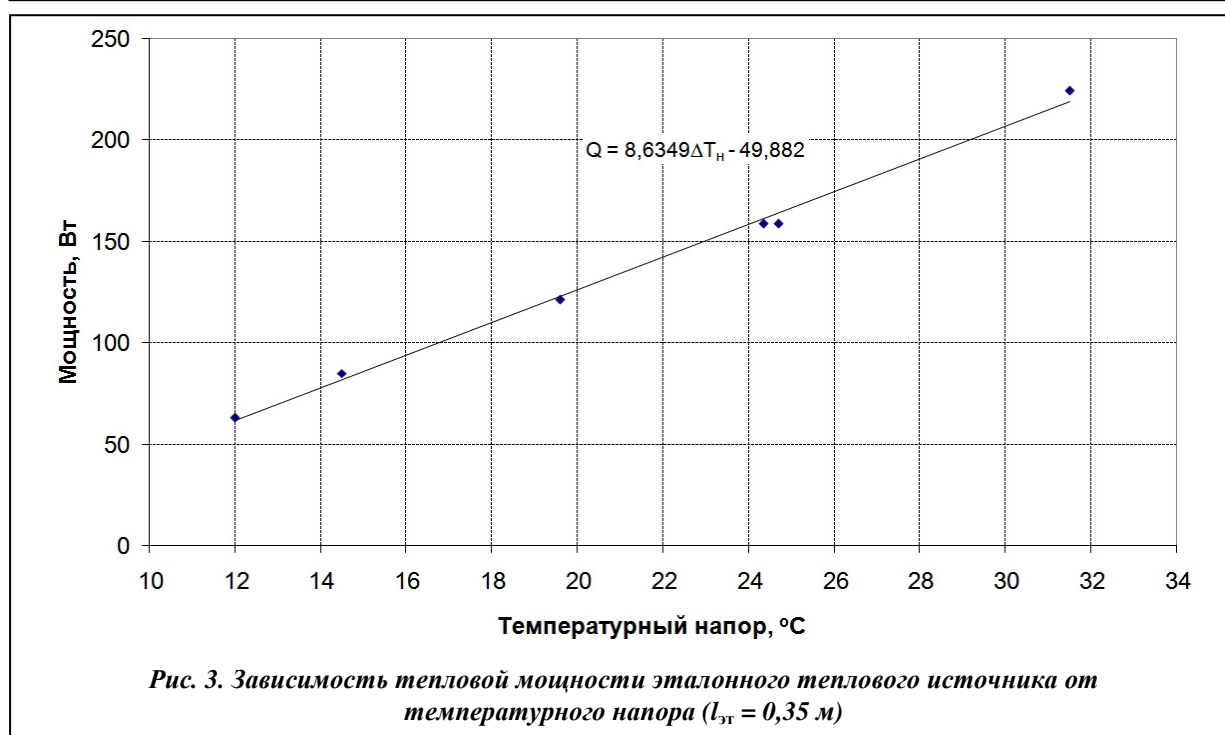
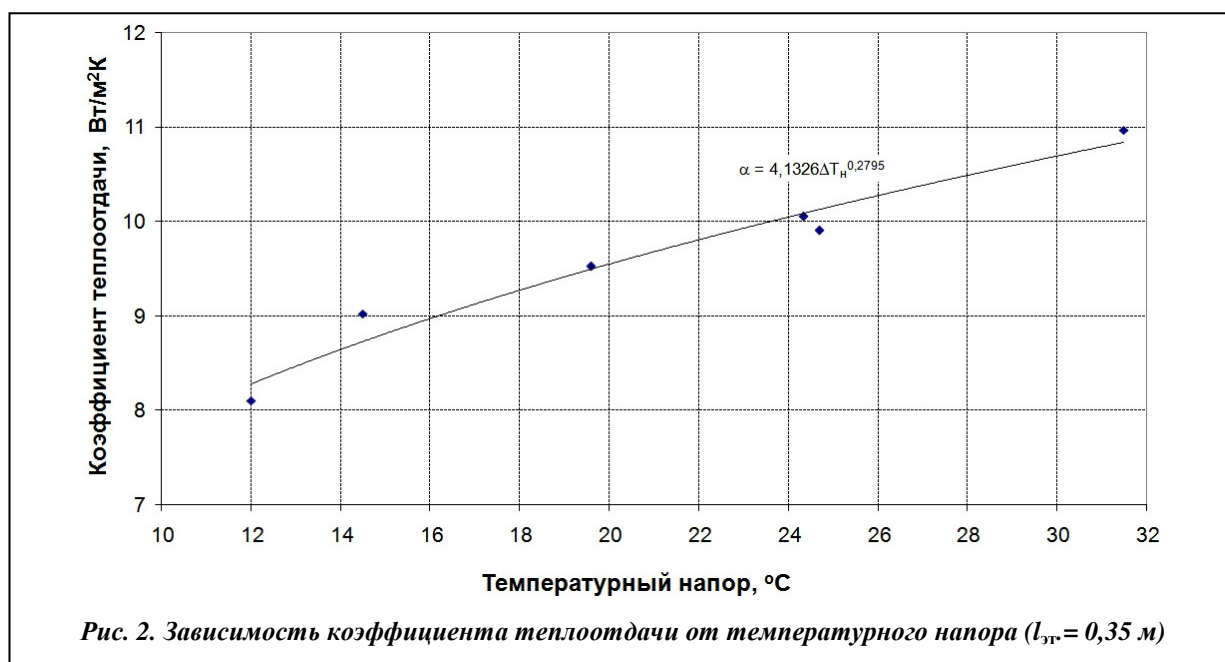
где F – сечение измерительного канала в месте установки анемометра; W – массовая скорость воздуха; c_p – изобарная теплоемкость воздуха; l – длина участка трубы (эталона); d – диаметр трубы.

5. Определяется невязка $\delta N = N_{эл} - N_T$.

6. Проводятся опыты для других величин $N_{эл}$.

На рис. 2, 3 приведены результаты определения тепловых характеристик устройства.

Невязка между измеренными электрической и тепловой мощностями связана с качеством тепловой изоляции устройства (см. рис. 4, отличия между зависимостями 1 и 2).

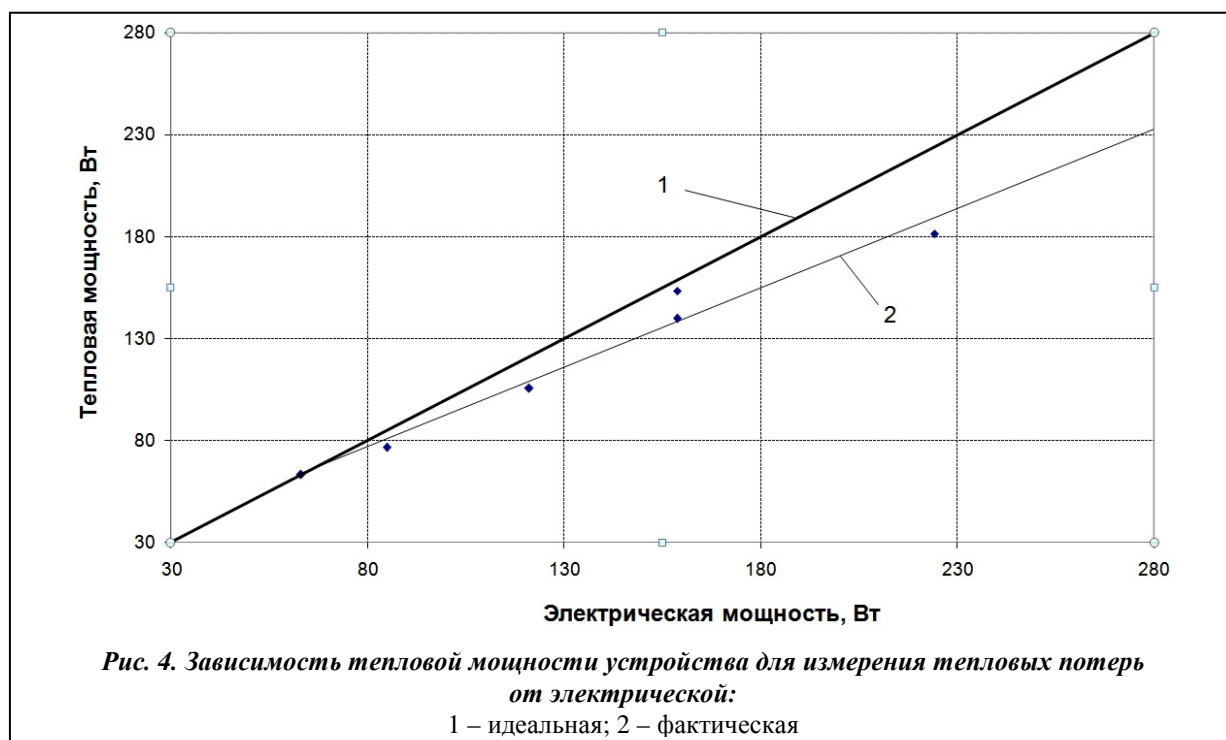


При проведении натуральных испытаний нагретого трубопровода величина невязки будет гораздо меньшей, поскольку торцевые стенки устройства (перпендикулярные оси трубопровода) с обеих сторон находятся практически в одинаковых условиях.

Измерения и обработка результатов проводились с учетом методик и рекомендаций, изложенных в [3–5].

Коэффициент преобразования электрической энергии в тепловую, измеряемую в эталонном устройстве, $K = \frac{Q_m}{Q_3} = 0,891$. Он может быть доведен до 0,99 путем увеличения термического сопротивления изоляции. Если проводить измерения тепловых потерь на трубопроводе с покрытием, а за-

тем без него при одной и той же температуре теплоносителя, то разница между ними даст энергетическую оценку качества изоляции.



Изменяя диаметр отверстий в торцевых крышках устройства, можно проводить измерения тепловых потерь для трубопроводов других размеров, что делает эталонное устройство универсальным средством для определения уровня тепловых потерь теплопроводов.

Литература

1. СНиП 2.04.14-88. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 28 с.
2. Байбаков, С. А. Методики определения и оценки фактических потерь через изоляцию в водяных сетях систем централизованного теплоснабжения без отключения потребителей / С. А. Байбаков, А. С. Тимошкин // Новости теплоснабжения. – 2009. – № 5. – С.38–44.
3. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Мукомел. – М.-Л.: Энергия, 1965. – 424 с.
4. Геращенко, О. А. Тепловые и температурные измерения. Справ. руководство / О. А. Геращенко, В. Г. Федоров – Киев: Наук. думка, 1965. – 304 с.
5. Осипова, В. А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена / В. А. Осипова. – М.: Энергия, – 1979. – 320 с.

Поступила в редакцию 18.11.16