

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.577.42

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ СЕТИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ДЛЯ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В УСТРОЙСТВЕ УТИЛИЗАЦИИ

С.А. БАННИКОВА, В.М. ЗАХАРОВ, М.В. КОЗЛОВА
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: sabannikova@rambler.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Существенная величина потерь тепловой энергии при ее транспортировке в системе теплоснабжения приходится на потери в окружающую среду через тепловую изоляцию трубопроводов. По данным Федеральной службы государственной статистики, потери тепловой энергии в тепловых сетях составляют от 8,5 до 16 % от количества поданной в систему энергии. В работах Р.А. Ильина, В.М. Фокина, А.С. Скрипченко изложены способы снижения тепловых потерь путем применения технических решений, направленных на повышение тепловой и гидроизоляционной защиты тепловых сетей. Однако вопрос утилизации теряемой теплоты не рассмотрен. Актуальность настоящего экспериментального исследования обусловлена необходимостью определения доли фактических тепловых потерь, предназначенных для утилизации, для выполнения условия постоянства параметров теплоносителя в тепловой сети.

Материалы и методы. Исследования проведены на запатентованном «Устройстве по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы», которое состоит из коллектора, воспринимающего тепловые потери от трубопроводов тепловой сети и парокompрессионного трансформатора теплоты, повышающего потенциал «собранный» тепловой энергии до необходимых параметров. Создана экспериментальная установка, позволяющая исследовать процессы переноса тепловой энергии в сети теплоснабжения. При проведении эксперимента фиксировались значения теплового потока для трех различных конфигураций установки. Полученные результаты экспериментального исследования обрабатывались методом математической статистики.

Результаты. Предложен вариант повышения эффективности работы тепловых сетей путем применения запатентованного «Устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы». Впервые экспериментально определена доля тепловых потерь, которую можно использовать для утилизации в предлагаемом оригинальном устройстве, не оказывая влияния на тепловой режим работы сети теплоснабжения.

Выводы. Определена доля тепловых потерь для утилизации в предлагаемом устройстве, равная половине фактических тепловых потерь сети теплоснабжения. Полученные результаты позволяют определять количество тепловой энергии, предназначенной для утилизации в «Устройстве по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы» в рамках проведения энергосберегающих мероприятий, позволяющих повысить эффективность работы тепловых сетей с различными диаметрами трубопроводов.

Ключевые слова: энергосбережение, тепловые потери, система теплоснабжения, устройство утилизации тепловых потерь, перенос тепловой энергии

EXPERIMENTAL ESTIMATION OF THERMAL LOSSES OF THE HEAT SUPPLY NETWORK FOR USING THEM IN A RECOVERY DEVICE

S.A. BANNIKOVA, V.M. ZAKHAROV, M.V. KOZLOVA
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: sabannikova@rambler.ru

Abstract

Background. A large part of the heat lost when thermal energy is transported through the heating system is made up by convection and radiation losses through thermal isolation of pipelines. According to the Federal State Statistics Service,

heat losses of the heat supply systems account for 8,5–16 % of the energy supplied to the system. R.A. Ilyin's, V.M. Fokin's and A.S. Skripchenko's works describe the ways of reducing heat losses by applying technical solutions aimed at better heat insulation and waterproofing of heat supply systems. However, the problem of heat loss recovery has not been considered. The timeliness of the present experimental study is associated with the need to determine the share of the actual heat losses that should be utilized to ensure constant parameters of the heat carrier in the heating system.

Materials and methods. The research has been done on a patented «device for heat loss recovery in the heating duct» that consists of a collector receiving the thermal losses from the pipelines of a thermal network and a heat pump, raising the potential of the «accumulated» thermal energy to the required parameters. An experimental installation has been created allowing the study of heat power transfer processes within a heating system. During the experiment, we recorded the values of the heat flow for three different configurations of the installation. The obtained results of the experimental study were processed by the method of mathematical statistics.

Results. The present article proposes a variant of increasing the overall performance of thermal networks, by applying patented «Devices for heat loss recovery in the heating duct». For the first time, we have experimentally determined the share of heat losses which can be recovered in the proposed original device, not affecting the thermal operating mode of the heat supply network.

Conclusions. The share of heat losses that can be recovered in the proposed device has been found to be equal to a half of the actual heat losses in a heat supply network. The obtained results allow determining the amount of thermal energy that can be utilized in a «Device for heat loss recovery in the heating duct» as part of energy-saving measures enhancing the operation efficiency of heating networks with different pipeline diameters.

Key words: energy saving, heat losses, heat supply system, device for heat loss recovery, thermal power transfer

DOI: 10.17588/2072-2672.2019.1.005-011

Состояние вопроса. Задача рационального использования топливно-энергетических ресурсов сегодня является непреходящей. Система теплоснабжения в Российской Федерации является наиболее емким по потреблению топлива сектором экономики [1]. Большим потенциалом энергосбережения обладает сфера теплоснабжения жилых, общественных и промышленных зданий, что требует к ней особого внимания. По данным Федеральной службы государственной статистики, потери тепловой энергии в системе теплоснабжения составляют от 8,5 до 16 % от количества поданной в систему энергии. Кроме того, проведенная в [2] оценка температурных полей подземных теплопроводов внутри канала и в прилегающем к нему грунте говорит о достаточном потенциале энергосбережения в данной сфере, что, учитывая физический износ тепловых сетей, делает проблему повышения качества и эффективности транспорта тепловой энергии особенно актуальной.

Ниже предложен способ повышения эффективности одного из элементов системы теплоснабжения промышленных предприятий – тепловых сетей.

Проблемы эффективности системы транспорта тепловой энергии определяются следующими обстоятельствами [1]:

- высоким уровнем тепловых потерь;
- избыточной централизацией систем теплоснабжения, которая обуславливает завышение нормативных потерь на 5–10 %;
- высокой степенью износа тепловых сетей и превышением критического уровня частоты отказов;

- неудовлетворительным техническим состоянием тепловых сетей, нарушением тепловой изоляции и связанными с этим высокими значениями потерь тепловой энергии;

- нарушением гидравлических режимов тепловых сетей.

Вопросам повышения эффективности тепловых сетей посвящены современные исследования А.С. Скрипченко [3], Р.А. Ильина, В.М. Фокина [4], но вопросы утилизации неизбежно теряющейся тепловой энергии в них не рассматриваются. О возможности использования потерь тепловой энергии говорится в работе С.А. Голяка и И.Е. Сикерина [2], однако указанный этими авторами вариант утилизации тепловых потерь имеет ограниченное применение из-за обстоятельств его организации.

Одним из вариантов совершенствования работы тепловых сетей является применение энергосберегающих мероприятий, направленных на сокращение тепловых потерь. На первом этапе их проведения необходимо установить целесообразность этих действий, определяемую величиной тепловых потерь.

Вышеизложенное обстоятельство приводит к необходимости определять тепловые потери в сети теплоснабжения в течение отопительного периода при соответствующих температурах наружного воздуха и окружающего тепловую сеть грунта. Расчетные значения потерь тепловой энергии находятся по заданной толщине изоляционного слоя для закрытой двухтрубной системы теплоснабжения с подземной прокладкой в непроходных каналах с качественным методом регулирования отпуска теплоты для климатических параметров Центральной России (г. Иваново). Толщина изоляцион-

ного слоя принимается в соответствии с техническими рекомендациями по проектированию тепловых сетей. При этом расчеты были выполнены для различных температурных графиков работы тепловых сетей (150/70, 130/70, 105/70, 95/70).

На рис. 1 в качестве примера приведено распределение потерь тепловой энергии в двухтрубной тепловой сети диаметром 200 мм, полученное расчетным путем.

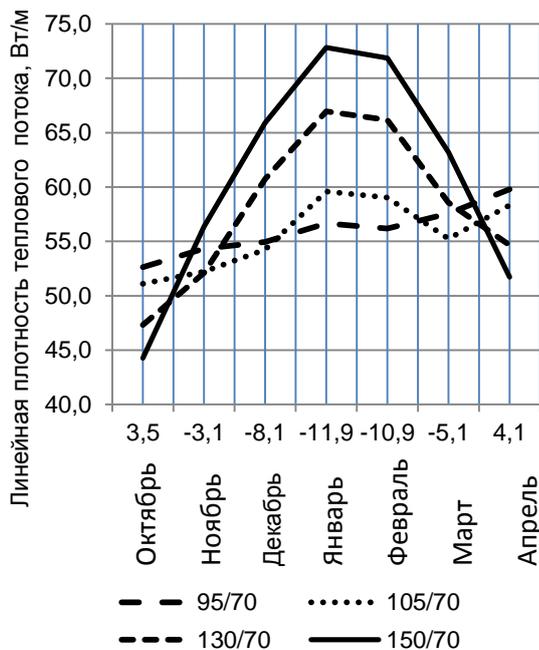


Рис. 1. Распределение величины тепловых потерь в течение отопительного периода при соответствующих среднемесячных температурах наружного воздуха

Анализ полученных данных показывает, что для тепловой сети диаметром 200 мм величина тепловых потерь в отопительный период не опускается ниже 44 Вт/м и не превышает 73 Вт/м. В целом для сетей диаметром от 50 до 400 мм тепловые потери в течение отопительного периода находятся в диапазоне от 20 до 104 Вт/м, что, учитывая протяженность сетей, говорит о возможности применения энергосберегающих мероприятий.

Известны и широко распространены геотермальные теплонасосные системы, предназначенные для выработки тепловой энергии. Источником низкопотенциальной энергии для этих устройств служит естественная теплота грунта. Принцип работы такого устройства заключается в восприятии тепловой энергии от грунта с помощью вертикального, горизонтального геотермального замкнутого контура (коллектора) с циркулирующим в нем теплоносителем, который передает воспринятую энергию в испаритель теплового насоса. Теплосъем кол-

лекторов зависит от ряда параметров, таких как вид и качество грунта, наличие грунтовых вод и т.д. Например, для климата Германии теплосъем горизонтального коллектора для суглинка и влажных почв составляет 30–40 Вт на погонный метр. Однако продолжительность работы тепловых насосов с таким коллектором даже для климатических условий Германии ограничена теплым периодом года и равна 2400 часов в год. Таким образом, в местах, где возможно естественное восполнение тепловой энергии грунта путем, например, воздействия на него солнечной радиации или за счет энергии недр земли, применение данных систем довольно актуально в теплый период года.

Аналогичная геотермальная теплонасосная система легла в основу идеи устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы, для работы которого низкопотенциальным источником являются тепловые потери сети теплоснабжения [5]. То есть тепловые потери являются внутренним источником тепловой энергии грунта.

Устройство по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы предложено в качестве энергосберегающей технологии в системах централизованного теплоснабжения промышленных предприятий в условиях, когда источник и сети находятся в собственности самого предприятия, что создает наиболее благоприятные условия для реализации энергосберегающих мероприятий. Основной задачей устройства является утилизация неизбежных тепловых потерь в сетях теплоснабжения. При этом выработанная тепловая энергия может быть использована для нужд горячего водоснабжения или отопления рядом расположенных зданий и сооружений в течение всего года.

Устройство по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы состоит из коллектора и сопряженного с ним пароконденсационного трансформатора теплоты (рис. 2). Коллектор, расположенный в канале теплотрассы вдоль трубопроводов тепловой сети, предназначен для восприятия линейных тепловых потерь от трубопроводов тепловой сети системы теплоснабжения и передачи полученной энергии в испаритель трансформатора теплоты, который, в свою очередь, позволяет повысить потенциал воспринятой тепловой энергии до требуемых параметров.

Теплосъем коллектора будет зависеть от способа прокладки трубопроводов, их диаметра, температурного графика работы сети, температуры наружного воздуха и грунта.

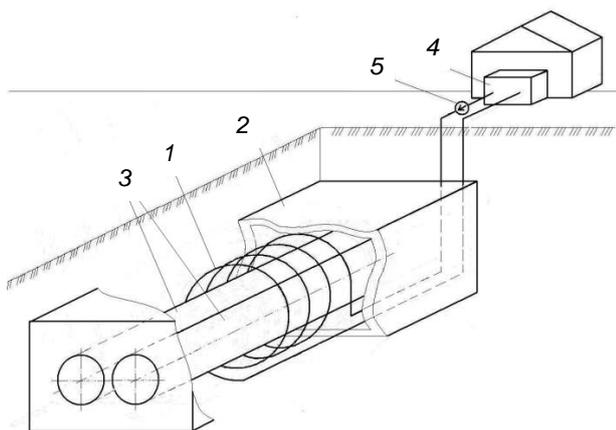


Рис. 2. Принципиальная схема устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы: 1 – коллектор; 2 – канал теплотрассы; 3 – трубопроводы тепловой сети; 4 – испаритель теплового насоса; 5 – циркуляционный насос

Материалы и методы. Необходимым условием отбора энергии от сети теплоснабжения является поддержание такого теплового режима ее работы, при котором не происходит увеличения тепловых потерь вследствие работы устройства. В то же время следует организовать максимально возможный и достаточный для работы трансформатора теплоты теплосъем.

Таким образом, в целях организации работы предлагаемого устройства, при которой отбор теплоты не будет оказывать негативного влияния на тепловой режим сети теплоснабжения, было принято решение установить теплоотражающие экраны вокруг трубопроводов тепловой сети, отсекающие часть теплового потока. При этом тепловая энергия, теряющаяся с поверхности экрана в окружающую среду, может быть полностью использована для дальнейшей генерации теплоты в трансформаторе теплоты.

Данное обстоятельство определяет цель экспериментального исследования, заключающаяся в определении тепловосприятности коллектора, входящего в состав устройства, для различных диаметров трубопроводов сети.

Максимальное количество тепловой энергии, воспринимаемое коллектором, выражается в долях от величины фактических тепловых потерь (до установки устройства).

В задачи экспериментального исследования входит:

- разработка и создание экспериментальной установки;
- определение теплового потока на наружной поверхности канала;
- построение зависимостей плотности теплового потока по длине канала;
- анализ полученных результатов.

Для исследования процесса передачи тепловой энергии в элементах тепловой сети, эффективности теплоотражающих экранов и в последующем для определения тепловосприятности коллектора была создана экспериментальная установка, принципиальная схема которой показана на рис. 3.

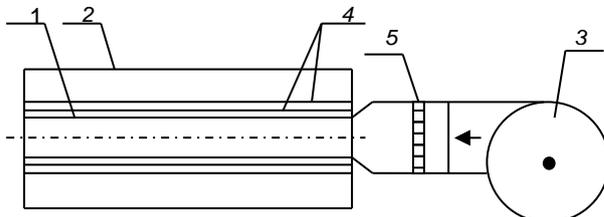


Рис. 3. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – трубопровод; 2 – стенки канала; 3 – вентилятор с теплоэлектронагревателем; 4 – теплоотражающий экран; 5 – хонейкомб

Поскольку в работе значимым является исследование влияния теплоотражающих экранов на процесс теплообмена, экспериментальное исследование было решено разбить на три этапа, соответствующих трем различным конфигурациям экспериментальной установки, а именно:

- базовой конструкции (№1);
- базовой конструкции с расположенным вокруг трубопровода теплоотражающим экраном (№2);
- базовой конструкции с двумя теплоотражающими экранами (№3).

Базовая конструкция экспериментальной установки включает в себя полимерную цилиндрическую гладкостенную трубу, канал в форме параллелепипеда прямоугольного сечения, выполненный из оргстекла, и вентилятор с теплоэлектронагревателем (ТЭНом), выполняющий роль источника тепловой энергии. На входе в трубопровод со стороны источника тепловой энергии установлена спрямляющая решетка (хонейкомб), предназначенная для выравнивания поля скоростей по сечению трубопровода.

Для опытов, связанных с исследованием работы теплоотражающих экранов, базовая конструкция экспериментальной установки оснащается теплоотражающими экранами, выполненными из алюминиевой фольги.

Принципиальным в эксперименте является соблюдение геометрического подобия установки и тепловой сети, позволяющее экстраполировать результаты исследований на реальную тепловую сеть. При этом теплофизические характеристики трубопровода и подвижного теплоносителя в нем не влияют на цель исследования. С точки зрения источника тепловой энергии система «горячий воздух – полимерная труба» эквивалентна системе «горячая вода –

изолированный трубопровод водяной тепловой сети».

Установка работает следующим образом. Холодный воздух при помощи вентилятора с ТЭНом нагревается и поступает в трубопровод, где по мере движения теряет тепловую энергию и затем удаляется в окружающую среду. При

этом на наружной поверхности канала наблюдаются и фиксируются значения плотности теплового потока.

В табл. 1 показаны технические и геометрические характеристики элементов экспериментальной установки.

Таблица 1. Технические и геометрические характеристики материалов экспериментальной установки

| Наименование | Технические характеристики | | | | Геометрические характеристики, мм | |
|-------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| | Материал | Плотность, кг/м ³ | Теплопроводность, Вт/мК | Теплоемкость, Дж/кгК | Внутренний диаметр × толщина стенки | Высота × ширина × толщина стенки |
| Трубопровод | Полипропилен | 900–910 | 0,16–0,22 | 1930 | 50×1,8 | – |
| Теплоотражающий экран 1 | Алюминий | 2600 | 221 | 840 | 70×0,1 | – |
| Теплоотражающий экран 2 | Алюминий | 2600 | 221 | 840 | 100×0,1 | – |
| Канал | Оргстекло | 1100–1200 | 0,196 | 1800 | – | 200×190×4 |

Экспериментальное исследование проведено на базе сертифицированной лаборатории. В ходе проведения эксперимента контролировались температуры и скорость воздуха внутри трубопровода. Измерение температуры производилось в начале и конце участка, при этом датчики температур располагались по оси трубы. Измерение плотности тепловых потоков было выполнено в 15 точках, по 5 точек на верхней, боковой и нижней поверхности канала соответственно (рис. 4).

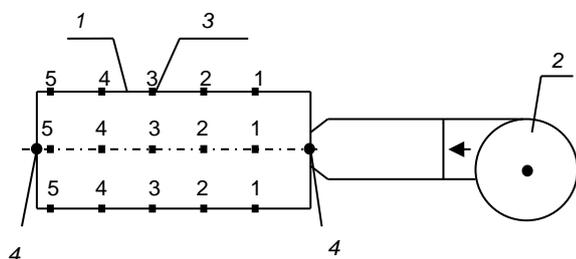


Рис. 4. Схема расположения датчиков измерительного прибора экспериментальной установки: 1 – канал; 2 – вентилятор с ТЭНом; 3 – датчик измерения плотности теплового потока; 4 – датчик измерения температуры

Плотность теплового потока и температура в указанных точках измерялись прибором ИТП – МГ4.03 «ПОТОК», а скорость воздуха – универсальным измерительным прибором АТЕ-9538.

Длительность измерения температур и тепловых потоков в каждой контрольной точке составила 5 минут, включая период адаптации датчиков к температурным условиям каждой точки и время измерений. Период времени 5 минут был определен в процессе предварительных измерений.

Для подтверждения требуемой точности экспериментальных данных в каждой точке было произведено по 5 замеров плотности потока тепловой энергии. При этом периодически производился контроль замеров теплового потока посредством измерения разности температур при помощи дифференциальной термопары «хромель – капель» на стенке канала, выполненного из оргстекла, с последующей подстановкой полученных значений в уравнение Фурье. При этом физические свойства оргстекла при фиксированной толщине стабильно определяются в диапазоне 0,196–0,199 Вт/мК и используются в качестве эталона. В ходе эксперимента были получены данные, показанные в табл. 2, 3.

Математическая обработка экспериментальных данных проводилась в соответствии с алгоритмом, представленным в [6, 7]. Расчет произведен для коэффициента надежности 0,95, которому соответствует Критерий Стьюдента, равный 2,776.

Таблица 2. Плотности теплового потока на наружной поверхности канала (экспериментальная установка №1)

| Сторона канала | Замер | Плотность теплового потока, Вт/м ² | | | | |
|----------------|-------|---|-------|-------|-------|-------|
| | | Позиция измерительного прибора | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Верхняя | Мин | 193,8 | 192,6 | 187,1 | 181,6 | 175,7 |
| | Макс | 205,0 | 198,2 | 197,0 | 187,9 | 182,2 |
| Боковая | Мин | 103,1 | 99,0 | 94,1 | 90,5 | 81,0 |
| | Макс | 110,8 | 103,6 | 105,1 | 99,8 | 85,0 |
| Нижняя | Мин | 61,6 | 60,3 | 54,3 | 60,0 | 51,1 |
| | Макс | 68,7 | 62,1 | 62,5 | 66,3 | 54,5 |

Таблица 3. Плотности теплового потока на наружной поверхности канала (экспериментальные установки №2 и №3)

| Сторона канала | Замер | Плотность теплового потока, Вт/м ² | | | | | | | | | |
|----------------|-------|---|------|------|------|------|-----------------------------------|------|------|------|------|
| | | С одним теплоотражающим экраном | | | | | С двумя теплоотражающими экранами | | | | |
| | | Позиция измерительного прибора | | | | | Позиция измерительного прибора | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Верхняя | Мин | 93,8 | 93,4 | 90,5 | 85,7 | 84,3 | 63,7 | 62,1 | 60,2 | 58,8 | 58,0 |
| | Макс | 99,2 | 99,5 | 98,4 | 90,0 | 89,0 | 68,5 | 66,7 | 65,8 | 63,3 | 62,4 |
| Боковая | Мин | 43,0 | 42,6 | 42,1 | 44,2 | 43,5 | 30,0 | 27,1 | 26,1 | 25,8 | 25,0 |
| | Макс | 49,9 | 47,9 | 47,6 | 46,7 | 48,5 | 34,1 | 32,4 | 28,4 | 29,7 | 33,4 |
| Нижняя | Мин | 15,2 | 12,0 | 10,9 | 13,0 | 12,4 | 9,8 | 11,0 | 10,5 | 12,6 | 10,3 |
| | Макс | 17,3 | 15,3 | 13,8 | 15,9 | 13,8 | 14,3 | 14,3 | 13,3 | 13,5 | 11,5 |

В ходе математической обработки экспериментальных данных были определены среднеарифметическое значение плотности теплового потока в каждой точке, абсолютная погрешность измерений, дисперсия, среднеквадратичное отклонение, границы доверительного интервала и относительная погрешность измерений.

Предел допускаемой основной погрешности равен относительной погрешности измерительного прибора, которая в диапазоне измерения тепловых потоков от 2 до 30 составляет 7 %, а в диапазоне от 30 до 500 – 5 %. Таким образом, общая погрешность измерений определена относительной погрешностью измерительного прибора, так как результат измерений плотности теплового потока с надежностью $\alpha = 0,95$ не выходит за допустимые пределы.

Результаты. Результаты проведенного эксперимента свидетельствуют о том, что основной поток тепловой энергии от трубопроводов направлен на боковую и верхнюю стороны канала вследствие влияния конвективной составляющей, что определяет наиболее приемлемые места расположения коллектора в канале теплотрассы. Также в результате проведенного исследования определена эффективность теплоотражающих экранов, входящих в состав предлагаемого устройства и способов их установки, выраженная в степени снижения теплового потока от трубопроводов на 50 % при установке с одного экрана, и на 65–70 % – двух экранов. При этом определяющей значимостью является лучистая составляющая. Тепловая энергия, теряющаяся с поверхности теплоотражающего экрана в окружающую среду, может полностью использоваться устройством.

Таким образом, тепловосприятие коллектора допустимо принять в размере 50 % от фактических тепловых потерь в тепловых сетях. Учитывая необходимость в периодическом техническом обслуживании теплотрассы, кото-

рое подразумевает вскрытие канала, оптимальным решением будет размещение коллектора устройства вдоль боковых поверхностей канала, что обеспечит беспрепятственный доступ к трубопроводам.

Выводы. Полученные результаты позволяют определять количество тепловой энергии для работы устройства в приложении к тепловым сетям с различными диаметрами трубопроводов.

Список литературы

1. **Фортов В.Е., Попель О.С.** Энергетика в современном мире. – Долгопрудный: Изд. дом «Интеллект», 2011. – 168 с.
2. **Голяк С.А., Сикерин И.Е.** Оценка температурных полей подземных теплопроводов с целью утилизации теряемой теплоты // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции», 23–25 ноября 2005. – М.: МГСУ, 2005.
3. **Скрипченко А.С.** Повышение эффективности работы тепловых сетей // Инновационная наука. – 2016. – № 5–2. – С. 166–169.
4. **Ильин Р.А., Фокин В.М.** Энергосбережение в тепловых сетях при теплоснабжении потребителей // Энергосбережение и водоподготовка. – 2015. – № 2. – С. 43–45.
5. **Пат. 94988** Российская Федерация на полезную модель. Устройство по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы / В.М. Захаров, С.А. Банникова. 2010.
6. **Калоша В.К., Лобко С.И., Чикова Т.С.** Математическая обработка результатов эксперимента. – Мн.: Выш. шк., 1982. – 103 с.
7. **Мурашкина Т.И.** Техника физического эксперимента и метрология: учеб. пособие. – СПб.: Политехника, 2015. – 138 с.

References

1. Fortov, V.E., Popel', O.S. *Energetika v sovremennom mire* [Power Industry in the Modern World]. Dolgoprudny: Izdatel'skiy dom «Intellect», 2011. 168 p.
2. Golyak, S.A., Sikerin, I.E. *Otsenka temperaturnykh poley podzemnykh teploprovodov s tsel'yu utilizatsii teryaemoy teploty* [Estimation of Temperature

Fields of Underground Heat Supply Systems for Heat Loss Recovery]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Teoreticheskie osnovy teplogazosnabzheniya i ventilyatsii», 23–25 noyabrya 2005* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference «Theory of Heat and Gas Supply and Ventilation», November 23–25, 2005]. Moscow: MGSU, 2005.

3. Skripchenko, A.S. Povyshenie effektivnosti raboty teplovykh setey [Improving of the efficiency of heating systems]. *Innovatsionnaya nauka*, 2016, no. 5–2, pp. 166–169.

4. Il'in, R.A., Fokin, V.M. Energoberezhnie v teplovykh setyakh pri teplosnabzhenii potrebitel'ey [Power

Saving in Consumer Heating Systems]. *Energoberezhnie i vodopodgotovka*, 2015, no. 2, pp. 43–45.

5. Zakharov, V.M., Bannikova, S.A. *Ustroystvo po utilizatsii teplovykh poter' v kanale teplotrassy* [A Device for Heat Loss Recovery in a Heating System Duct]. Patent RF, no. 94988, 2010.

6. Kalosha, V.K., Lobko, S.I., Chikova, T.S. *Matematicheskaya obrabotka rezul'tatov eksperimenta* [Mathematical Processing of Experiment Results]. Minsk: Vysh. shkola, 1982. 103 p.

7. Murashkina, T.I. *Tekhnika fizicheskogo eksperimenta i metrologiya* [Physical Experiment Procedure and Metrology]. Saint-Petersburg: Politehnika, 2015. 138 p.

Банникова Светлана Андреевна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры промышленной теплоэнергетики, e-mail: sabannikova@rambler.ru

Bannikova Svetlana Andreyevna,

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer at the Department of Industrial Heat Power Engineering, e-mail: sabannikova@rambler.ru

Захаров Вадим Михайлович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», профессор кафедры промышленной теплоэнергетики, e-mail: sabannikova@rambler.ru

Zakharov Vadim Mikhailovich,

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor at the Department of Heat Power Engineering, e-mail: sabannikova@rambler.ru

Козлова Мария Владимировна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», студент кафедры промышленной теплоэнергетики, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

Kozlova Maria Vladimirovna,

Ivanovo State Power Engineering University, Student at the Department of Heat Power Engineering, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

УДК 536.24:621.1.016.4

РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕННИКОВ С УЧЕТОМ СТРУКТУРЫ ПОТОКОВ¹

Т.М. ФАРАХОВ, Е.П. АФАНАСЬЕВ, А.Г. ЛАПТЕВ

ФГБОУВО «Казанский государственный энергетический университет»,

г. Казань, Российская Федерация

E-mail: tv_t_kgeu@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Теплообменные аппараты, применяемые в различных отраслях промышленности и на ТЭС, имеют различные режимные, конструктивные характеристики и габаритные размеры, но, несмотря на значительное разнообразие конструкций, их расчет чаще всего выполняется на основе модели идеального вытеснения потоков. В ряде случаев это может привести к заниженному значению поверхности теплопередачи. В связи с этим актуальным является разработка математической модели и алгоритма расчета теплообменников с учетом обратного перемешивания теплоносителей, когда структура потоков отличается от модели идеального вытеснения.

Материалы и методы. Расчет теплообменников представлен с применением метода чисел единиц переноса, по аналогии с массообменом, с поправкой на обратное перемешивание теплоносителей. Поправка выполняется с применением модифицированного числа Пекле структуры потока, что дает некоторое увеличение длины труб теплообменника и, соответственно, поверхности теплопередачи.

¹ Работа выполнена в рамках научного проекта РНФ 18-79-10136.