

УДК 697.343:620.193.94

Эльвира Раисовна Базукова

ФГБОУВО «Казанский государственный энергетический университет», старший преподаватель кафедры промышленной теплоэнергетики и систем теплоснабжения, Россия, Казань, телефон (843) 519-42-55, e-mail: pts_kgeu@mail.ru

Юрий Витальевич Ваньков

ФГБОУВО «Казанский государственный энергетический университет», доктор технических наук, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики и систем теплоснабжения, Россия, Казань, телефон (843) 519-42-55, e-mail: pts_kgeu@mail.ru

Сергей Олегович Гапоненко

ФГБОУВО «Казанский государственный энергетический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики и систем теплоснабжения, Россия, Казань, телефон (843) 519-42-55, e-mail: pts_kgeu@mail.ru

Николай Николаевич Смирнов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-89, e-mail: nsmirnov@bk.ru

Исследование коэффициента теплопроводности изоляции из базальтового волокна при различных температурных режимах

Авторское резюме

Состояние вопроса. Для тепловой защиты систем, транспортирующих высокотемпературные теплоносители, преимущественно применяется промышленная тепловая изоляция из волокнистых материалов (минераловатные и стекловолокнистые изделия). Известные в литературе данные о влиянии плотности изоляции и температурных режимов эксплуатации на теплофизические свойства материалов из базальтового волокна значительно разнятся. Учет данных факторов позволит повысить до 60 % точность тепловых расчетов и обоснованность проектных решений по тепловой защите промышленных сетей. Целью исследования является получение информации об изменении теплозащитных свойств изоляционных материалов из базальтового волокна различной плотности в зависимости от температурных режимов эксплуатации.

Материалы и методы. Экспериментальное исследование теплофизических свойств нескольких образцов изоляции из базальтового волокна осуществлено на лабораторном стенде. Плотность постоянного теплового потока, проходящего через образец, определена методом дополнительной стенки. Экспериментальная установка состоит из металлической цилиндрической трубы с встроенным электронагревателем, поверх которой располагается теплоизоляционный материал из базальтового волокна различной плотности. Диапазон изменения температуры на поверхности трубы от 50 до 350 °С.

Результаты. Получена зависимость коэффициента теплопроводности образцов тепловой изоляции из базальтового волокна от ее плотности и температуры эксплуатации материала. Установлено, что при увеличении температуры поверхности трубопровода коэффициент теплопроводности изоляции из базальтового волокна также возрастает, причем чем ниже значение плотности материала, тем выше приращение коэффициента теплопроводности.

Выводы. Полученные результаты расширяют имеющиеся сведения о зависимости теплопроводности теплоизоляционных материалов от плотности и температуры (для случаев эксплуатации при высоких температурах). Учет плотности исследованных материалов из базальтового волокна при определении теплопроводности позволит повысить точность расчетов до 20 %, температурных режимов эксплуатации – до 60 %. Полученные результаты могут быть применены при нахождении толщины тепловой изоляции трубопроводов и тепловых потерь в сетях.

Ключевые слова: тепловые потери, деструкция тепловой изоляции, коэффициент теплопроводности, метод дополнительной стенки, паропровод

Elvira Raisovna Bazukova

Kazan State Power Engineering University, Senior Lecturer of Industrial Heat Power Engineering and Heat Supply Systems Department, Russia, Kazan, telephone (843) 519-42-55, e-mail: pts_kgeu@mail.ru

Yuri Vitalievich Vankov

Kazan State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Head of Industrial Heat Power Engineering and Heat Supply Systems Department, Russia, Kazan, telephone (843) 519-42-55, e-mail: pts_kgeu@mail.ru

Sergey Olegovich Gaponenko

Kazan State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Industrial Heat Power Engineering and Heat Supply Systems Department, Russia, Kazan, telephone (843) 519-42-55, e-mail: pts_kgeu@mail.ru

Nikolay Nikolayevich Smirnov

Ivanovo State Power Engineering University, Senior Lecturer of Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-89, e-mail: nsmirnov@bk.ru

Study of thermal conductivity coefficient of basalt fiber insulation at various temperature conditions

Abstract

Background. Industrial thermal insulation fibrous materials (mineral wool and fiberglass products) are mainly used for thermal protection of the systems transporting high-temperature heat carriers. The data known in the scientific literature about the effect of insulation density and operating temperature conditions on the thermophysical properties of materials made of basalt fiber differ significantly. Taking these data into account let us improve the accuracy of thermal calculations and the validity of design solutions for thermal protection of industrial networks up to 60 %. The aim of the study is to obtain data on the change of the heat-shielding properties of insulating materials made of basalt fiber of various densities, depending on the temperature conditions of operation.

Materials and methods. An experimental study of the thermophysical properties of several samples of basalt fiber insulation has been carried out on a laboratory bench. The density of a constant heat flux passing through the sample has been determined by the additional wall method. The experimental unit consists of a cylindrical metal tube with a built-in electric heater, on the top of which a heat-insulating basalt fiber of various densities is placed. The temperature on the pipe surface is changed in the range from 50 to 350 °C.

Results. The dependence of the thermal conductivity coefficient of thermal insulation basalt fiber samples on its density and operating temperature of the material is obtained. The research results show that thermal conductivity coefficient of basalt fiber insulation increases with temperature increase of the pipeline surface. The lower the value of the material density is, the higher the increment of the thermal conductivity coefficient is.

Conclusions. The obtained results enrich the data about the dependence of the thermal conductivity of fibrous heat-insulating materials on density and temperature (for cases of operation at high temperatures). Considering the density of the examined materials made of basalt fiber when determining the thermal conductivity makes it possible to increase the accuracy of calculations up to 20 % and temperature modes of operation up to 60 %. The results obtained can be applied to find the thickness of the thermal insulation of pipelines and heat losses in the networks.

Key words: heat losses, destruction of thermal insulation, thermal conductivity coefficient, additional wall method, steam pipe

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.4.015-024

Введение. Распоряжением¹ Правительства РФ от 09.06.2020 г. была утверждена «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года» (ЭС-2035). Согласно данному документу, в Российской Федерации имеется потенциал энергосбережения, достигающий третьей части текущего энергопотребления, и существуют возможности значительного

повышения экономической эффективности проектов в сфере энергетики. Уровни энергоёмкости производства важнейших отечественных промышленных продуктов выше среднемировых в 1,2–2 раза, а по отношению к лучшим мировым практикам – в 1,5–4 раза.

Повышению энергоэффективности уделяется особое внимание как главному направлению повышения эффективности экономики страны. ЭС-2035 предполагает снижение уровня энергоёмкости ВВП на 50 % к 2035 г. (от уровня 2010 г.), без чего

¹ Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 г. № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года».

энергетический сектор неизбежно будет сдерживать социально-экономическое развитие страны.

Одним из направлений для решения поставленных задач обозначено повышение надежности и эффективности теплосетевого комплекса, создание энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии.

В структуре энерготехнологических комплексов можно выделить три основные части:

- 1) источник – совокупность промышленных агрегатов и технологических процессов, производящих энергию;
- 2) системы транспорта и распределения энергетических ресурсов;
- 3) потребители энергетических ресурсов (промышленные предприятия).

Эффективность использования топливно-энергетических ресурсов зависит от эффективного взаимодействия каждой из перечисленных частей.

Энерготехнологические комплексы, где в больших объемах используются высокотемпературные теплоносители, имеют высокий потенциал энергосбережения.

Применение тепловой изоляции со стабильными характеристиками для изоляции промышленного оборудования и трубопроводов, транспортирующих высокотемпературные теплоносители, поможет обеспечить выполнение планов по энергосбережению в системах транспортировки и распределения энергетических ресурсов.

По оценкам экспертов [1–4], потери теплоты через изолированные поверхности существующих промышленных сооружений, оборудования и трубопроводов составляют 356 млн Гкал/год, или 65 млн т у.т/год; через изоляцию теплопроводов тепловых сетей – 324 млн Гкал/год, или 59,5 млн т у.т/год. В качестве изоляции трубопроводов активно используются такие материалы, как пенополиуретан, пенополистирол, вспененный полиэтилен, минеральная вата, стекловолокно и т.д. Среди современных перспективных способов снижения теплопотерь в тепловых сетях необходимо отметить использование тонкопленочных покрытий, состоящих из полых микросфер в связующем вязком материале [5], применение теплоотражающих металлических экранов [6, 7], образующих замкнутые воздушные прослойки, и другие технологии.

Для тепловой изоляции систем, транспортирующих высокотемпературные теплоносители, применяется промышленная тепловая изоляция, подавляющая часть (85–90 %) которой монтируется из волокнистых материалов (минераловатные и стекловолоконные изделия).

Промышленная тепловая изоляция отличается широким температурным диапазоном эксплуатации, который составляет от –180 до 600 °С.

Температурный режим эксплуатации промышленной тепловой изоляции, интенсивные тепловлажностные и механические воздействия окружающей среды оказывают существенное влияние на снижение теплозащитных свойств теплоизоляционного материала в процессе эксплуатации [8–10].

Так, например, были проведены исследования [11–13], в результате которых установлено, что в процессе эксплуатации паропровода, транспортирующего пар с температурой 315 °С, коэффициент теплопроводности слоя теплоизоляции, примыкающей к зоне высокой температуры, увеличился в 1,5–2 раза. Фактическое состояние тепловой изоляции, особенно на отдельных участках, может значительно отличаться от первоначального, предусмотренного проектом (рис. 1).

Снижение теплозащитных свойств теплоизоляционных материалов в процессе эксплуатации определяет их долговечность.

Игнорирование перечисленных факторов при выборе теплоизоляционных материалов и проектировании тепловой изоляции приводит к преждевременной деградации свойств теплоизоляционных материалов, нарушению работоспособности всей системы транспортирования теплоносителя, что приводит к сверхнормативным тепловым потерям.

Сверхнормативные тепловые потери через изолированную поверхность промышленных сооружений, оборудования, трубопроводов и тепловых сетей достигают 244 млн Гкал, или 44 млн т у.т/год².

² Жолудов В.С. Повышение теплозащитных свойств теплоизоляционных конструкций из волокнистых материалов для промышленных сооружений: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2000. – 197 с.



Рис. 1. Образец теплоизоляционного материала с температурной деструкцией

Для повышения эксплуатационной надежности систем, транспортирующих высокотемпературные теплоносители, необходимо учитывать изменения теплозащитных свойств промышленной тепловой изоляции с учетом особенностей ее эксплуатации.

Для определения изменения теплофизических свойств тепловой изоляции в процессе эксплуатации были проведены лабораторные исследования по определению изменения коэффициента теплопроводности теплоизоляционного материала в зависимости от изменения температуры изолируемой поверхности (в диапазоне от 50 до 400 °С) и плотности теплоизоляционного материала.

Материалы и методы. Несмотря на то, что в современной научной литературе уделяется большое внимание вопросам, связанным с определением тепловых потерь, в настоящее время в нормативных документах³ отсутствует методика расчета тепловых потерь, учитывающая неоднородность теплоизоляции по длине трубопровода и факторы, приводящие к снижению теплозащитных свойств покрытия: старение, изменение толщины, провисание, частичное отсутствие и увлажнение изоляции.

Для решения задач по определению теплопроводности разных тел целесообразно использовать аналитические решения, но эти решения, учитывающие пере-

менность свойств теплопроводности от температуры, практически отсутствуют [14]. Для проверки сложных численных решений [15] уместно использовать результаты натурального эксперимента.

Проверку состояния изоляции трубопроводов в условиях эксплуатации предлагается осуществлять с помощью устройства, в основе работы которого лежит метод дополнительной стенки⁴ [16–17]. Он состоит в том, что к поверхности стенки, тепловые потери которой необходимо определить, плотно прижимается дополнительная стенка с известными теплопроводностью λ_0 , толщиной δ_0 и, следовательно, термическим сопротивлением R_0 (рис. 2).

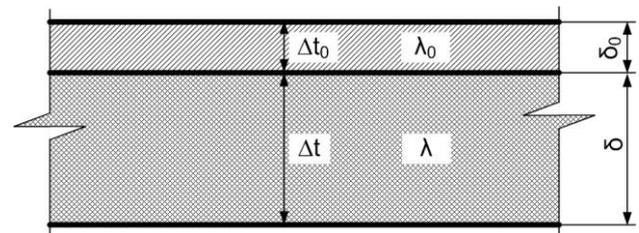


Рис. 2. Иллюстрация метода «дополнительной» стенки

Измеряя перепад температуры Δt_0 в дополнительной стенке, можно найти тепловой поток q , проходящий через нее, по уравнению

$$q = \frac{\lambda_0}{\delta_0} \Delta t_0. \quad (1)$$

³ Приказ Министерства энергетики РФ от 30 декабря 2008 г. № 325 «Об утверждении порядка определения нормативов технологических потерь при передаче тепловой энергии, теплоносителя»; СП 41-103-2000. Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. – Введ. 01.01.2013. – М.: Минрегион России, 2012. – 47 с.

⁴ ГОСТ 7076-99. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. – Введ. 01.04.2000. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2000. – 23 с.

Если термическое сопротивление дополнительной стенки по сравнению с термическим сопротивлением основной изоляции невелико, то при установившемся тепловом состоянии такой же тепловой поток пройдет и через основную стенку. Этот поток и составляет искомые тепловые потери.

Экспериментальная установка (рис. 3, 4) состоит из металлической цилиндрической трубы 1, поверхность которой располагается теплоизоляционный материал из базальтового волокна в виде полого цилиндра с продольным разрезом 2. Длина трубы составляет 500 мм, наружный диаметр – 32 мм. Металлическая цилиндрическая труба представляет собой патронный электрический нагреватель ТЭНП (стальная труба с вмонтированным внутри нагревателем). Максимальная мощность нагревателя составляла 2500 Вт,

рабочая температура – до 400 °С (на всей поверхности металлической цилиндрической трубы). Контроль температуры нагрева ТЭНП осуществлялся с помощью измерителя температуры 9, а регулирование данного параметра внутри трубы – с помощью лабораторного автотрансформатора 3. Для измерения температуры металлической трубы использовалась вмонтированная внутрь ТЭНП хромель-алюмелевая термопара ТХА 4. Сигнал с датчиков считывался и преобразовывался с помощью аналого-цифрового преобразователя АЦП 5. Температура на холодном спае поддерживалась постоянной и измерялась терморезистором, размещенным в блоке АЦП. В персональном компьютере 8 осуществлялась обработка полученного сигнала с помощью разработанного программного обеспечения в программном комплексе LabVIEW.

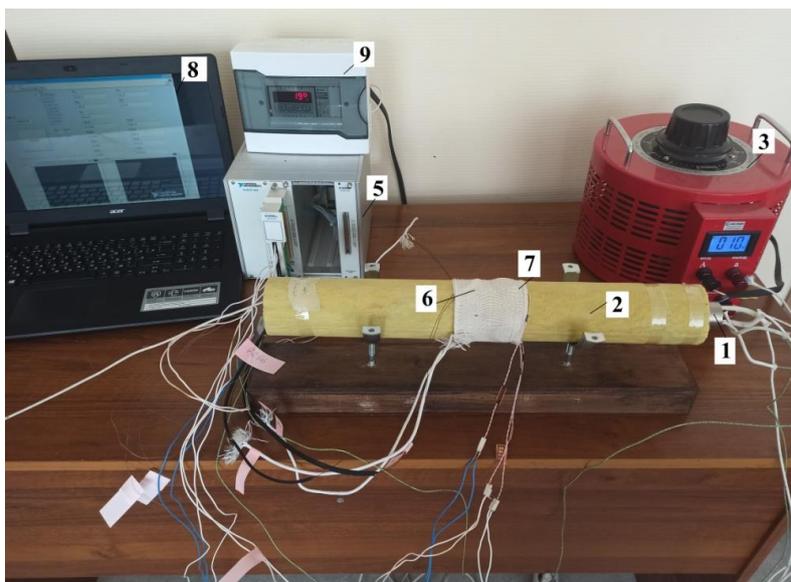


Рис. 3. Внешний вид экспериментальной установки для определения теплозащитных свойств теплоизоляционных материалов

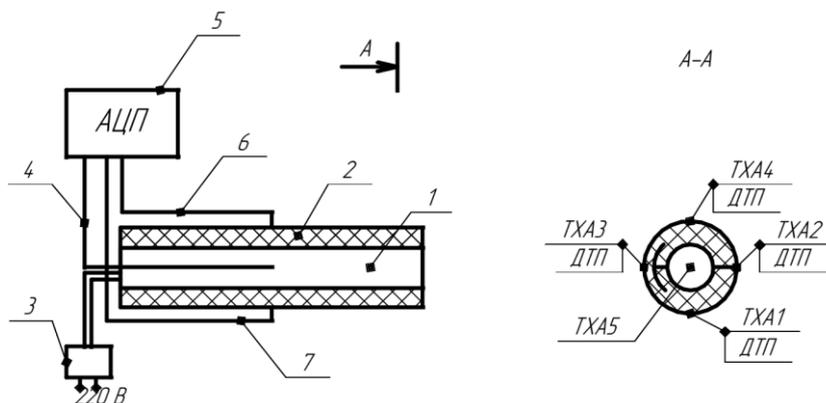


Рис. 4. Схема установки для определения коэффициента теплопроводности теплоизоляционного материала

Для измерения температуры поверхности изоляционного материала использовались также хромель-алюмелевые термопары ТХА 6 с рабочим диапазоном измеряемых температур от -200 до $+1100$ °С.

Для измерения плотности теплового потока на поверхность исследуемого теплоизоляционного материала устанавливались высокотемпературные датчики теплового потока (ДТП) 7 со следующими характеристиками:

- размер 52×10 мм;
- толщина 2 мм;
- диапазон измерения $10-1000$ Вт/м²;
- постоянная времени не более 10 с;
- коэффициент эффективной теплопроводности $0,5$ Вт/(м·К);
- толщина 2 мм.

Датчики теплового потока и термопары установлены в средней части трубы по периметру исследуемого образца на 3, 6, 9 и 12 часов (рис. 4).

Чувствительным элементом датчика теплового потока является гипербатарея медь-константановых пар, выполненных по гальванической технологии. На квадратном сантиметре датчика умещается до 1500 термопар. Их суммарный сигнал пропорционален разности температур на толщине датчика и, следовательно, тепловому потоку через него. Плотность теплового потока через датчик определяется умножением сигнала на тарировочный коэффициент. Коэффициент индивидуален для каждого датчика, указывается в паспорте датчика и имеет порядок от 5 до 40 Вт/(м²·мВ). Термическое сопротивление датчика теплового потока толщиной 2 мм составляло $0,0166$ (м²·К)/Вт. Данное сопротивление вносило погрешность в измерения не более 3 %.

Измерения и обработка экспериментальных данных проводились на оборудовании и программном обеспечении фирмы National Instruments. Для регистрации сигналов датчиков теплового потока использовалась модульная система согласования сигналов SCXI 1102. Система SCXI включает в себя промышленное шасси с установленными в него согласующими модулями. Аналоговые входные модули служат интерфейсом для датчиков и сигналов и повышают качество и достоверность измерений посредством высокопроизводительных, малошумящих цепей согласования: усиления, изоляции, мультиплексирования,

фильтрации, питания датчиков, устройств выборки и хранения и коммутации сигналов. Сигналы подключаются к модулям через съемные коннекторы с винтовыми соединениями, BNC разъемы или термопарные вилки.

Плотность теплового потока q определялась после установления в зоне измерения стационарного теплового режима.

При известной плотности теплового потока определялся коэффициент теплопроводности исследуемого материала из формулы закона Фурье:

$$\lambda = \frac{q}{(t_1 - t_2)} \delta, \quad (2)$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м²; δ – толщина исследуемого образца теплоизоляции, м; $(t_1 - t_2)$ – разность температур лицевых граней испытываемого образца, измеряемая с помощью термопар, °С.

Оценка погрешности измерений температуры, плотности тепловых потоков, теплопроводности производилась в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011⁵. Абсолютная погрешность косвенных измерений теплопроводности материала составила $0,0018$ Вт/(м·°С), относительная – 4,7 %.

Результаты. Была проведена серия экспериментов, во время которых температура на наружной поверхности металлической трубы поддерживалась 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350 °С.

Всего было проведено 3 блока опытов по испытанию 9 образцов тепловой изоляции из базальтового волокна плотностью 80, 100, 120 кг/м³. Толщина исследуемых образцов составляла 17 мм, длина – 500 мм.

На рис. 5 и в табл. 1–3 приведены зависимости теплопроводности λ теплоизоляционного материала из базальтового волокна от плотности и температуры для каждого из блоков опытов.

⁵ ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. – Введ. 13.11.2011. – М.: Стандартинформ, 2013. – 20 с.

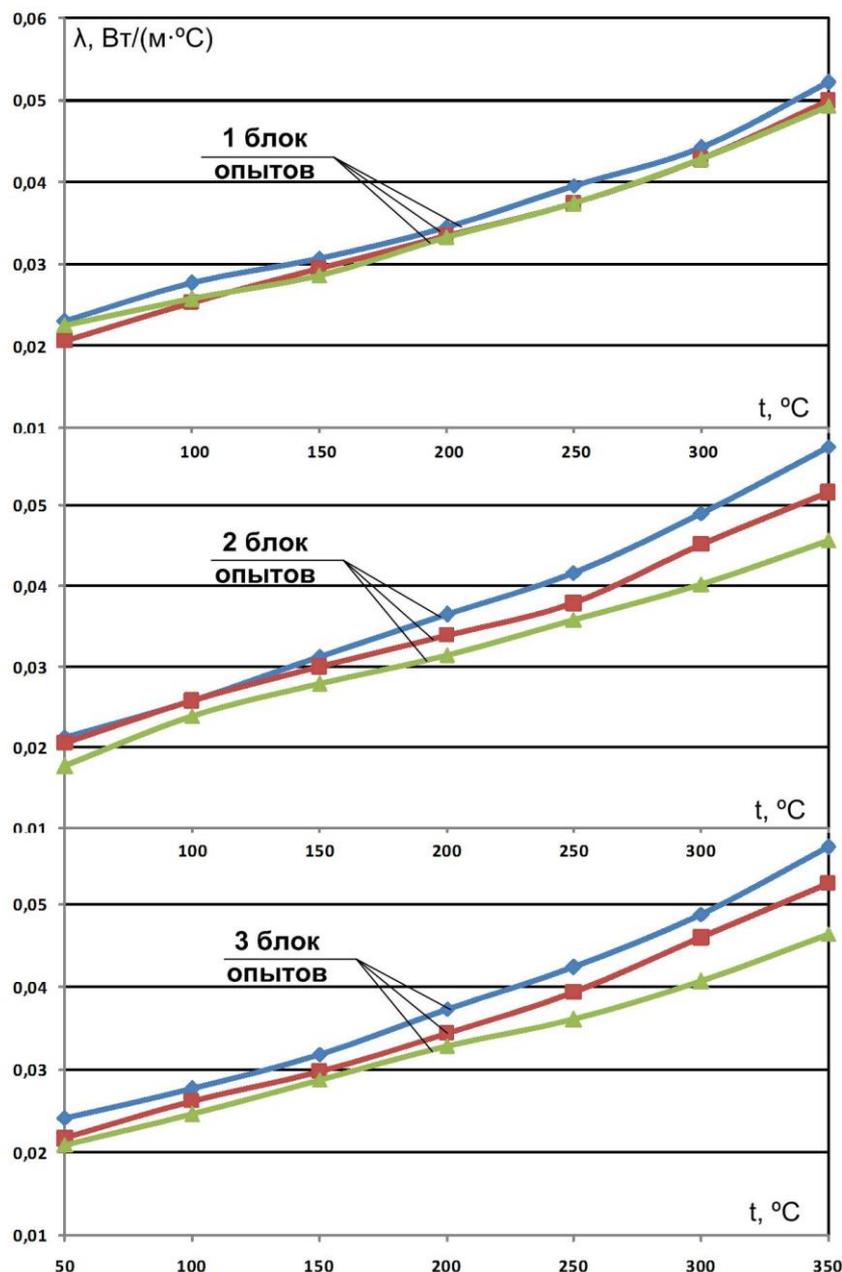


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплопроводности λ образцов теплоизоляционного материала из базальтового волокна от температуры изолируемой поверхности и плотности: \blacklozenge – 80 кг/м^3 ; \blacksquare – 100 кг/м^3 ; \blacktriangle – 120 кг/м^3

Таблица 1. Значения коэффициента теплопроводности λ теплоизоляционного материала из базальтового волокна в зависимости от плотности материала и температуры изолируемой поверхности (1 блок опытов)

Температура изолируемой поверхности, °C	Теплопроводность λ , Вт/(м·°C)		
	при плотности 80 кг/м^3	при плотности 100 кг/м^3	при плотности 120 кг/м^3
50	0,0230	0,0206	0,0226
100	0,0277	0,0254	0,0258
150	0,0307	0,0295	0,0287
200	0,0345	0,0334	0,0333
250	0,0396	0,0374	0,0374
300	0,0442	0,0428	0,0429
350	0,0522	0,0499	0,0493

Таблица 2. Значения коэффициента теплопроводности λ теплоизоляционного материала из базальтового волокна в зависимости от плотности материала и температуры изолируемой поверхности (2 блок опытов)

Температура изолируемой поверхности, °С	Теплопроводность λ , Вт/(м·°С)		
	при плотности 80 кг/м ³	при плотности 100 кг/м ³	при плотности 120 кг/м ³
50	0,0213	0,0206	0,0177
100	0,0258	0,0258	0,0240
150	0,0313	0,0300	0,0279
200	0,0365	0,0339	0,0315
250	0,0417	0,0379	0,0359
300	0,0490	0,0452	0,0403
350	0,0573	0,0516	0,0457

Таблица 3. Значения коэффициента теплопроводности λ теплоизоляционного материала из базальтового волокна в зависимости от плотности материала и температуры изолируемой поверхности (3 блок опытов)

Температура изолируемой поверхности, °С	Теплопроводность λ , Вт/(м·°С) при плотности		
	при плотности 80 кг/м ³	при плотности 100 кг/м ³	при плотности 120 кг/м ³
50	0,0242	0,0217	0,0209
100	0,0277	0,0263	0,0246
150	0,0319	0,0298	0,0288
200	0,0374	0,0345	0,0329
250	0,0424	0,0394	0,0361
300	0,0488	0,0460	0,0407
350	0,0569	0,0526	0,0464

Анализ полученных результатов показывает:

– зависимость теплопроводности минераловатных изделий из базальтового волокна от температуры практически линейна;

– коэффициент теплопроводности минераловатных изделий из базальтового волокна повышается с увеличением температуры изолируемой поверхности; причем чем ниже значение плотности материала, тем выше приращение коэффициента теплопроводности. При уменьшении плотности материала увеличивается количество и размер воздушных включений, сквозных пор и капилляров, образующих структуру материала, что приводит к интенсификации конвективных процессов и увеличению теплопроводности. Данная закономерность также наблюдается для некоторых материалов, например таких как маты и плиты из стеклянного штапельного волокна⁶;

– максимальная разница между значениями коэффициента теплопроводности λ теплоизоляционного материала из ба-

зальтового волокна, в зависимости от плотности изоляционного материала (80, 100, 120 кг/м³), составила 13,5 %.

Выводы. Полученные результаты расширяют имеющиеся сведения о зависимости теплопроводности волокнистых теплоизоляционных материалов от плотности и температуры (в условиях эксплуатации при высоких температурах), а также способствуют накоплению экспериментальных данных для практического использования и проверки новых теоретических представлений о характере теплообменных процессов в волокнистых теплоизоляционных материалах.

Учет этих особенностей при проектировании тепловой изоляции позволит выбирать теплоизоляционные материалы с оптимальными свойствами и размерами, обеспечивающими величину тепловых потерь в пределах нормативных значений, стабильность теплозащитных свойств в процессе эксплуатации, долговечность тепловой изоляции и эксплуатационную надежность системы транспортирования тепловой энергии.

⁶ СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. – Введ. 01.01.2012 г. – М.: ЦПП, 2012. – 100 с.

Список литературы

1. **Гурьев В.В., Жолудов В.С., Петров-Денисов В.Г.** Тепловая изоляция в промышленности. Теория и расчет. – М.: Стройиздат, 2003. – 415 с.

2. **Смородова О.В.** Динамика теплозащитных свойств минераловатной тепловой изоляции со временем эксплуатации // Научно-практический электронный журнал Аллея Науки. – 2017. – № 9.

3. **Теплоизоляционные материалы и конструкции** / Ю.Л. Бобров, Е.Г. Овчаренко, Б.М. Шойхет, Е.Ю. Петухова. – М.: Инфра-М, 2003. – 268 с.

4. **Zwierzchowski R., Niemyjski O.** Influence of different operating conditions of a district heating and cooling system on heat transportation losses of a district heating network // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 471, Session 3. – 6 p. DOI: 10.1088/1757-899X/471/4/042019

5. **Бухмиров В.В., Гаськов А.К.** Применение тонкопленочных покрытий в целях энергосбережения // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 5. – С. 26–31. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.5.026-031.

6. **Банникова С.А., Захаров В.М., Козлова М.В.** Экспериментальное определение тепловых потерь сети теплоснабжения для их использования в устройстве утилизации // Вестник ИГЭУ. – 2019. – Вып. 1. – С. 5–11. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.1.005-011.

7. **Пат.** на полезную модель №120197 Российская Федерация. Устройство для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы / В.М. Захаров, Н.Н. Смирнов. – М.: РОСПАТЕНТ, 2012.

8. **Фазлиев Р.А., Гапоненко С.О.** Анализ тепловых потерь через теплоизоляционные конструкции и методы повышения энергоэффективности путем их снижения // Материалы XIV Междунар. молодежной науч. конф. «Тинчуринские чтения». В 3 т. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2019. – С. 158–162.

9. **Шакурова Р.З., Гапоненко С.О.** Повышение эффективности энергетических систем и систем транспортировки энергоносителя с использованием методов математического моделирования // Материалы XXIV Междунар. молодежной науч. конф. «Туполевские чтения (школа молодых ученых)». – Казань: ИП Сагиева А.Р., 2019. – С. 641–644.

10. **Zakirova I.A., Chichirova N.D.** The improving effectiveness thermal insulation of heating systems with thin-film covering using // International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET). – 2019. – Vol. 10, Issue 01. – P. 1142–1146.

11. **Исследование температурной деформации теплоизоляции паропровода /**

Ю.В. Ваньков, Э.Р. Базукова, Н.Д. Якимов и др. // Труды Академэнерго. – 2019. – № 4. – С. 98–108.

12. **Vankov Yu.V., Bazukova E.R., Gavrilov A.S.** Assessment of transport losses of heat at change of properties of thermal isolation // Journal of physics: Conference series, Earth and Environmental Science. – 2019. – No. 288, 012127. DOI: 10.1088/1755-1315/288/1/012127.

13. **Destruction** of thermal insulation and effectiveness of the thermal energy transfer system / E.R. Bazukova, T.O. Politova, E.R. Khaziakhmetova, et al. // E3S Web of Conferences. – 2019. – No. 124, 01030. DOI: 10.1051/e3sconf/201912401030.

14. **Мечтаева М.Н., Горбунов В.А., Иванова Н.Б.** Численное моделирование процессов сепарации влаги в парогенераторе ПГВ-1000М // Электрические станции. – 2020. – № 2. – С. 2–7. DOI: 10.34831/EP.2020.1063.2.001.

15. **Mechtaeva M.N., Ivanova N.B., Gorbunov V.A.** Numerical modeling of moisture separation processes in the PGV-1000m Steam Generator // Power Technology and Engineering – 2020. – No. 54(2). – P. 220–224. DOI: 10.1007/s10749-020-01194-y

16. **Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В.** Основы градиентной теплотометрии. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 215 с.

17. **Задачи** и решения в градиентной теплотометрии / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков и др. // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2019. – № 1. – С. 81–86.

References

1. Gur'ev, V.V., Zholudov, B.C., Petrov-Denisov, V.G. *Teplovaya izolyatsiya v promyshlennosti. Teoriya i raschet* [Thermal insulation in industry. Theory and calculation]. Moscow: Stroyizdat, 2003. 415 p.

2. Smorodova, O.V. *Dinamika teplozashchitnykh svoystv mineralovatnoy teplovoy izolyatsii so vremenem ekspluatatsii* [Dynamics of heat-shielding properties of mineral wool thermal insulation with time of operation]. *Nauchno-prakticheskiy elektronnyy zhurnal Alleya Nauki*, 2017, vol. 9.

3. Bobrov, Yu.L., Ovcharenko, E.G., Shoikhet, B.M., Petukhova, E.Yu. *Teploizolyatsionnye materialy i konstruksii* [Thermal insulation materials and structures]. Moscow: Infra-M, 2003. 268 p.

4. Zwierzchowski, R., Niemyjski, O. Influence of different operating conditions of a district heating and cooling system on heat transportation losses of a district heating network. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 471, session 3. 6 p. DOI: 10.1088/1757-899X/471/4/042019

5. Bukhmirov, V.V., Gas'kov, A.K. *Primenenie tonkoplenochnykh pokrytyy v tselyakh energosberezheniya* [Application of thin-film coatings for energy

saving]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 5, pp. 26–31. DOI: 10.17588 / 2072-2672.2015.5.026-031.

6. Bannikova, S.A., Zakharov, V.M., Kozlova, M.V. Eksperimental'noe opredelenie teplovykh poter' seti teplosnabzheniya dlya ikh ispol'zovaniya v ustroystve utilizatsii [Experimental estimation of thermal losses of the heat supply network for using them in a recovery device]. *Vestnik IGEU*, 2019, issue 1, pp. 5–11. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.1.005-011.

7. Zakharov, V.M., Smirnov, N.N. *Ustroystvo dlya utilizatsii teplovykh poter' v kanale teplotrassy* [Device for utilization of heat losses in the channel of the heating route]. Patent RF, no. 120197, 2012.

8. Fazliev, R.A., Gaponenko, S.O. Analiz teplovykh poter' cherez teploizolyatsionnye konstruksii i metody povysheniya energoeffektivnosti putem ikh snizheniya [Analysis of heat losses through heat-insulating structures and methods of increasing energy efficiency by reducing them]. *XIV Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya «Tinchorinskie chteniya»* [Proceedings of the XIV International Youth Scientific Conference "Tinchorin Readings"]. Kazan', 2019, pp. 158–162.

9. Shakurova, R.Z., Gaponenko, S.O. Povshenie effektivnosti energeticheskikh sistem i sistem transportirovki energonositelya s ispol'zovaniem metodov matematicheskogo modelirovaniya [Increasing the efficiency of energy systems and energy carrier transportation systems using mathematical modeling methods]. *XXIV Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya «Tupolevskie chteniya»* [Proceedings of the XXIV International Youth Scientific Conference "Tupolev Readings"]. Kazan', 2019, pp. 641–644.

10. Zakirova, I.A., Chichirova, N.D. The improving effectiveness thermal insulation of heating systems with thin-film covering using. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 2019, vol. 10, issue 01, pp. 1142–1146.

11. Van'kov, Yu.V., Bazukova, E.R., Yakimov, N.D., Sheshukov, E.G., Chichirova, N.D.

Issledovanie temperaturnoy destruksii teploizolyatsii paroprovoda [Investigation of the temperature destruction of the thermal insulation of a steam pipeline]. *Trudy Akademenergo*, 2019, vol. 4, pp. 98–108.

12. Vankov, Yu.V., Bazukova, E.R., Gavrilov, A.S. Assessment of transport losses of heat at change of properties of thermal isolation. *Journal of physics: Conference series, Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 288, 012127. DOI: 10.1088/1755-1315/288/1/012127.

13. Bazukova, E.R., Politova, T.O., Khasiakhmetova, E.R., Medyakov, A.A., Kolcunova, I. Destruction of thermal insulation and effectiveness of the thermal energy transfer system. *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 124, 01030. DOI: 10.1051/e3sconf/201912401030.

14. Mechtaeva, M.N., Gorbunov, V.A., Ivanova, N.B. Chislennoe modelirovanie protsessov separatsii vlagi v parogeneratore PGV-1000M [Numerical modeling of moisture separation processes in the PGV-1000M steam generator]. *Elektricheskie stantsii*, 2020, vol. 2, pp. 2–7. DOI: 10.34831/EP.2020.1063.2.001.

15. Mechtaeva, M.N., Ivanova, N.B., Gorbunov, V.A. Numerical modeling of moisture separation processes in the PGV-1000m Steam Generator. *Power Technology and Engineering*, 2020, vol. 54(2), pp. 220–224. DOI: 10.1007/s10749-020-01194-y

16. Sapozhnikov, S.Z., Mityakov, V.Yu., Mityakov, A.V. *Osnovy gradientnoy teplometrii* [Basics of gradient heat measurement]. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo Politekhnicheskogo universiteta, 2012. 215 p.

17. Sapozhnikov, S.Z., Mityakov, V.Yu., Mityakov, A.V., Barabanova, O.A., Salmin, P.A. Zadachi i resheniya v gradientnoy teplometrii [Problems and solutions in gradient heat measurement]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Aviatsionnaya tekhnika*, 2019, vol. 1, pp. 81–86.