

УДК 536.331

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СТЕПЕНИ ЧЕРНОТЫ СВЕРХТОНКИХ ЖИДКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ

**Анисимов Максим Васильевич<sup>1</sup>**,  
teploproekt@list.ru

**Лычагин Дмитрий Васильевич<sup>2</sup>**,  
dmitrylychagin@mail2000.ru

**Рекунов Виталий Сергеевич<sup>1</sup>**,  
Rekunovvs@mail.ru

**Таалайбеков Жаныбек Таалайбекович<sup>1</sup>**,  
jtaalaibekov@mail.ru

<sup>1</sup> Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
Россия, 634003, Томск, пл. Соляная, 2.

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Россия, 634050, Томск, пр. Ленина, 36.

**Актуальность работы** обусловлена современными мировыми тенденциями в области политики энерго- и ресурсосбережения, которые влекут за собой необходимость более экономного использования георесурсов Земли, в том числе в области строительства. Применение современных утепляющих материалов позволит во многом решить проблему рационального использования полезных ископаемых Земли. Оценка применимости различных современных теплоизолирующих покрытий представляет собой актуальную задачу, которая влечет за собой необходимость экспериментальной проверки значений интегральной степени черноты сверхтонких жидких композиционных теплоизолирующих покрытий и выявления их истинных значений.

**Цель исследования:** разработка метода измерений и лабораторной исследовательской установки и проведение эксперимента по определению значений степени черноты сверхтонких жидких композиционных покрытий разработанным методом.

**Методы исследования:** эмпирическое определение степени черноты покрытия с использованием предложенного лабораторного устройства, включающего в себя: систему «серых» тел, датчиков термопар и источника стационарного теплового потока.

**Результаты.** Экспериментально определена интегральная степень черноты сверхтонких жидких композиционных теплоизолирующих покрытий. Она составила для «Образца № 1»  $\varepsilon=0,89$ , для «Образца № 2»  $\varepsilon=0,87$  в измеряемых температурных границах 35–65 °С. Выполнен расчет погрешности измерений. Реальная степень черноты исследуемых образцов оказалась выше заявленной. Несмотря на это, подобные жидкие теплоизоляционные покрытия представляют большой интерес для строителей, т. к. позволяют утеплять объекты сложной геометрической формы (корпуса задвижек, сложные узлы и т. п.), что в ряде случаев делает их практически незаменимыми. Правильный учет теплотехнических качеств красок позволит избежать сверхнормативных увеличений тепловых потерь изолированных трубопроводов с теплоносителем или строительных ограждающих конструкций, а также защитит их от возможного размораживания в период отрицательных температур.

### **Ключевые слова:**

Эксперимент, тепловое излучение, интегральная степень черноты, теплоизоляция, жидкие сверхтонкие покрытия.

### **Анализ проблемы**

Современные мировые тенденции в области политики энерго- и ресурсосбережения требуют от различных материалоемких производств (в том числе строительной отрасли) экономного использования георесурсов. Использование современных утепляющих материалов позволит во многом решить проблему рационального применения полезных ископаемых Земли.

На сегодняшний день в строительной отрасли используется большое количество всевозможных теплоизоляционных материалов. Среди них встречаются хорошо себя зарекомендовавшие, например минераловатные утеплители, пенополиуретановые, пенополистирольные, из вспененного полиэтилена и многие др.

Сравнительно недавно на рынке появились сверхтонкие жидкие композиционные теплоизо-

лирующие покрытия (далее – теплоизолирующие краски) нового поколения (например, mascoat, tsmceramic, thermalcoat, Изоллат, Астратек, Альфатек, Теплокотт, Корунд и т. п.), предназначенные для тепловой изоляции фасадов здания и строительных конструкций, а также трубопроводов с теплоносителем.

По мнению производителей данных красок, они обладают исключительными теплоизолирующими качествами (например, коэффициент теплопроводности представленных материалов находится на уровне  $\lambda=0,001...0,002$  Вт/(м·°С)). В качестве сравнительного примера часто приводятся данные о том, что слой такой краски, толщиной от 1 до 3 мм, нанесенный на инженерные трубопроводы, может с успехом заменить изоляцию толщиной в несколько сантиметров широко известных минераловатных утеплителей [1–4]. Вместе с тем рабо-

ты некоторых авторов [5, 6] убедительно доказывают, что реальные значения теплопроводности и степени черноты указанных материалов существенно расходятся с паспортными данными производителей. Проведенные исследования в 2015 г. [7, 8] показали, что у двух выбранных жидких теплоизолирующих красок известных марок заявленный коэффициент теплопроводности не подтвердился.

Кроме того, производители часто приводят данные об особых теплоотражающих свойствах теплоизолирующих красок, благодаря которым емкость, покрытая указанными материалами, приобретает свойства термоса, что увеличивает общие теплоизолирующие свойства таких красок.

Как известно, высокими теплоотражающими свойствами обладает алюминий (интегральная степень черноты  $\varepsilon=0,03-0,05$ ), медь ( $\varepsilon=0,02-0,07$ ) и ряд других металлов. На принципе отражения теплового излучения основаны теплоизолирующие свойства таких утеплителей, как например Армофол, Экофол, Порилекс, Пенофол и др., которые имеют слой вспененного полиэтилена, покрытого тонким слоем алюминия. Предлагаемые теплоизолирующие краски таких покрытий не имеют, а, по мнению самих производителей, отражают инфракрасное излучение за счет использования газозаполненных или вакуумозаполненных микросфер, входящих в состав таких покрытий.

Подобные заявления производителей жидких теплоизолирующих покрытий в ряде случаев противоречат существующей теории теплообмена, т. к. изготовители не приводят теоретического обоснования тепловых эффектов, которые привели бы к такому результату, или они неоднозначны. На сегодняшний день исследования различных специалистов в этой области зачастую дают противоречивую информацию [1–6].

Следует отметить, что неправильный учет реальных теплоизоляционных качеств строительным материалов может привести к сверхнормативному увеличению тепловых потерь теплоизолированных трубопроводов с теплоносителем или строительных ограждающих конструкций. Кроме того, в ряде случаев это может привести к их возможному размораживанию в период отрицательных температур и прочим проблемам. Последующая замена жидких теплоизоляционных материалов на классические приведет к необоснованному перерасходу материалов, что противоречит энергосберегающей политике нашего государства, тем более что указанные теплоизолирующие краски имеют высокую цену.

Экспериментальное определение интегральной степени черноты как основного показателя способности тела отражать тепловое излучение для современных жидких теплоизолирующих покрытий в данном контексте является актуальной задачей. В связи с этим было принято решение о проведении экспериментального определения интегральной

степени черноты некоторых жидких теплоизолирующих покрытий с целью выявления их истинного значения.

#### Обзор существующих методов определения интегральной степени черноты материалов и постановка физической схемы ее вычисления

При планировании эксперимента по определению интегральной степени черноты жидких утепляющих покрытий был проведен обзор существующих методов [9–16] по заявленной теме исследований.

Так, например, в запатентованном методе измерений [9]  $\varepsilon$  вычисляется по зависимости

$$\varepsilon = 1 - \frac{P_m - P_o}{S\varepsilon_s\sigma(T_s^4 - T_c^4)}, \quad (1)$$

где  $P_m, P_o$  – мощности источника тепловыделений, затрачиваемые на нагрев эталонного и исследуемого образцов до стационарного значения температуры  $T_s, K$ ;  $T_c$  – температура среды,  $K$ ;  $\sigma=5,67\cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K}^4)$  – постоянная Стефана–Больцмана;  $S$  – теплоотдающая площадь поверхности образца,  $\text{м}^2$ ;  $\varepsilon_s$  – степень черноты поверхности эталонного образца.

Измерения степени черноты покрытий и свободных поверхностей твердых тел по методу [9] проводят последовательно с измерением температуры эталонного и исследуемого образцов, изготавливаемых из одного материала с нанесенным на эталонный образец покрытием с известной степенью черноты.

Причем образцы, изготовленные в виде двух одинаковых пластин с одинаковыми покрытиями, размещают параллельно один напротив другого покрытиями наружу, в полость между ними помещают электронагреватель. Далее устанавливают в воздушную среду, последовательно нагревают при постоянной мощности нагревателя до полного установления стационарного теплового режима, а степень черноты исследуемой поверхности определяют по приведенной формуле (1), что обеспечивает упрощение и повышение точности измерений степени черноты поверхности твердых тел.

В соответствии с алгоритмом предлагаемого способа [9] для проведения измерений степени черноты поверхностей берут образцы из требуемого материала, на который наносят контрольное и исследуемое покрытия. Форма образца – круглая пластинка толщиной, например, около 1 мм. Первыми в устройство устанавливаются образцы с покрытием, имеющим известную степень черноты, желательнее, чтобы контрольный образец имел степень черноты, близкую к единице, это позволяет получить наибольшую величину разности мощностей тепловыделений в обоих измерениях.

Также известен способ и устройство для определения теплофизических характеристик тонкослойных материалов [10]. Сущность метода заключается в том, что осуществляется предварительный нагрев до заданной температуры модели абсо-

лотно черного тела, образованного двумя идентичными, параллельно расположенными плоскими образцами совместно с боковыми и внутренними секционированными экранами, путем пропускания через образцы одинаковых электрических токов. После этого измеряют силу тока и падения напряжения в центральной зоне каждого из образцов, температуру внешней поверхности одного образца и внутренней поверхности второго образца. Далее производят импульсное тепловое воздействие на внешнюю поверхность одного из образцов, одновременно регистрируя температуру противоположной поверхности этого же образца, и, используя эти данные, рассчитывают набор искомым теплофизических характеристик – коэффициенты температуропроводности и теплопроводности, удельную теплоемкость, спектральную и интегральную степень черноты, удельное электросопротивление.

К недостаткам данного метода следует отнести сложность способа и устройства, ограничения на геометрию образцов, исследуемых с применением данного способа, а также трудности обеспечения малой погрешности измерений при регистрации нестационарных температур и последующем вычислении совокупности исследуемых параметров.

Известен другой способ определения степени черноты твердых тел [11]: образец в форме прямоугольного параллелепипеда нагревают электрическим током, измеряют мощность, выделяемую в стационарном тепловом режиме в осевом направлении участка образца. Измеряют температуры на поверхности параллелепипеда в серединах двух взаимно перпендикулярных граней и на расстоянии от его ребра, равном радиусу площадки визирования оптического пирометра, и по измеренным параметрам рассчитывают теплофизические характеристики.

Недостатком данного способа является то, что для обеспечения заданной точности измерений требуется точное и дорогостоящее оборудование для измерения величины лучистого теплового потока. Кроме того, имеются ограничения, связанные с необходимостью помещения образца в вакуумную камеру, а в случае ее отсутствия – с необходимостью учета тепловой мощности, отводимой конвекцией, что повышает погрешность измерений.

Кроме указанных методов существует способ измерения степени черноты твердых тел [12], при котором измеряют температуры и скорости изменения температуры эталонного и исследуемого образцов, причем эталонный образец изготавливают из того же материала, что и исследуемый образец. При этом на эталонный образец наносят покрытие с известной степенью черноты, сравнивают скорости изменения температуры эталонного и исследуемого образцов при их нагреве излучением черного тела в моменты времени, соответствующие одинаковой температуре, и определяют степень черноты по формуле

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \frac{\left(\frac{\partial T}{\partial \tau}\right)_1}{\left(\frac{\partial T}{\partial \tau}\right)_2}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_1$  – степень черноты исследуемого образца;  $\varepsilon_2$  – степень черноты эталонного образца;  $\left(\frac{\partial T}{\partial \tau}\right)_1$  и

$\left(\frac{\partial T}{\partial \tau}\right)_2$  – скорость изменения температуры исследуемого образца и эталонного образца при температуре, равной  $T$ .

Данный известный способ позволяет при наличии двух одинаковых образцов твердого тела, один из которых имеет покрытие с известной степенью черноты, при нагреве обоих образцов излучением абсолютно черного тела путем сравнения скоростей изменения температуры получать искомый параметр.

Недостатком указанного способа является необходимость замера скорости изменения температуры образцов в строго фиксированные моменты времени, когда температуры обоих образцов одинаковы. Кроме того, измерение скорости изменения обоих образцов требует дополнительного оборудования. Получение зависимости степени черноты твердого тела от температуры с помощью этого способа не обеспечивает постоянство точности параметра во всем диапазоне измерений, поскольку скорости изменения температуры образцов зависят от температуры.

Кроме вышеперечисленных методов существует ряд способов, которые подразумевают использование оптических приборов.

Известны способы определения теплофизических характеристик материалов, среди которых определение степени черноты поверхности, основанное на калометрическом методе с применением одного или нескольких контактных средств измерения температуры поверхности [13–15]. Как правило, все они имеют общие недостатки, такие как: потери теплоты от контакта датчиков температуры с поверхностью образца, нарушения структуры материала поверхности, а также высокая погрешность датчиков из-за большого числа измерительных элементов.

Существуют способы определения теплофизических характеристик с применением дистанционных приборов – пирометров (тепловизоров) [16]. При реализации таких способов осуществляется нагрев исследуемого образца и регистрируется инфракрасное (ИК) поле, образованное на различных сторонах образца. Для наведения оптической системы тепловизоров на образец применяют поворотные зеркала. Приборы измерения располагаются на различных расстояниях от зеркал. По данным измерений параметров ИК-поля производят



расчет теплофизических характеристик. Таким решениям аналогов присущи недостатки, связанные с влиянием на показания приборов прямого и отраженного излучений фона, а также искажения показаний под влиянием конвективного теплообмена, хотя по [10] нагрев самого образца термостатирован. Фактически эти решения основаны на регистрации суммарного ИК-излучения, поэтому данные имеют завышенные значения.

Существует способ, описанный в руководстве эксплуатации стационарного ИК-пирометра с цифровой обработкой сигнала «Термоскоп-200». Способ основан на измерении радиационной температуры от поверхности исследуемого образца материала, на который нанесен слой покрытия (краска, изоляция) с известным значением показателя степени черноты поверхности  $\varepsilon$ , и от участка без покрытия. Сначала прибор направляют на участок с покрытием, а затем на участок образца без покрытия. Путем варьирования величины  $\varepsilon$  добиваются совпадения значений радиационной температуры. Значение  $\varepsilon$ , соответствующее этому условию, принимается за искомое.

Для реализации такого способа использовано устройство, содержащее оптическую систему приема ИК-излучения в спектральном диапазоне 8...14 мкм с возможностью варьирования значений  $\varepsilon$ , регулировочное устройство, юстировочное устройство для наведения на малоразмерные предметы и систему защиты от отраженного ИК-излучения в виде кожуха с трубой из металла.

Для регулировочного устройства необходимо дополнительное приспособление для крепления, юстировочное рекомендовано к применению для образцов с температурой более 600 °С. Защита от отраженного ИК-излучения эффективна при длине трассы излучения 250 мм. При меньших расстояниях система должна эксплуатироваться без кожуха, а при большей длине трассы остается влияние вредного излучения фона. Кроме того, металлический кожух подвержен влиянию нагрева от окружающих тел и конвективных процессов окружающего фона. В прототипе приходится производить наклон оптической системы и менять угол визирования, вследствие чего меняются параметры сигнала (полезная и отраженная составляющие), а также соотношение площади разрешения оптической системы и полезной площади образца. Это может быть причиной неоднозначности показаний при сопоставлении измерений участков с покрытием и без покрытия. Отсутствуют обоснования применимости способа для условий слабо нагретых тел (в диапазоне естественных изменений температуры), что позволяет предполагать наличие широкого спектра составляющих всего спектрального диапазона и, следовательно, погрешности при выборе конечной величины радиационной температуры. Кроме того, измерения осуществляют для территориально разнесенных участков образца, которые могут иметь различные свойства,

характерные для композитных материалов и тонкопленочных покрытий.

Кроме того, были рассмотрены работы зарубежных [17–27] и российских авторов [28, 29], которые проводили исследования по схожим вопросам.

При анализе существующих методов экспериментального определения интегральной степени черноты различных материалов были сделаны следующие выводы:

1. Как правило, указанные методы сложны и требуют большого количества дорогостоящего оборудования либо наличия вакуума в системе.
2. Ряд методов не рассчитан на исследование  $\varepsilon$  для сверхтонких жидких композиционных теплоизолирующих покрытий.
3. Температурный режим при нагревании по ряду методов может вызвать внутреннюю деформацию или тепловое разрушение теплоизолирующих красок, так как они не рассчитаны на работу в температурных условиях выше 200 °С, а также изменения их теплофизических свойств.
4. Имеются ограничения на геометрию образцов.
5. Требуется учет количества теплоты с высокой точностью, затрачиваемой на нагрев исследуемых образцов.

По результатам проведенного анализа имеющихся методов исследований было принято решение о разработке собственного алгоритма вычисления  $\varepsilon$  для указанных утепляющих покрытий, который позволил бы проводить измерения с удовлетворительной точностью с учетом особенностей физических свойств образцов.

Как известно, из закона Стефана–Больцмана следует выражение для расчета плотности потока собственного излучения (лучеиспускательной способности) серого тела:

$$E = \varepsilon E_0 = \varepsilon \sigma_0 T^4 = \varepsilon c_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4 = c \left( \frac{T}{100} \right)^4, \quad (3)$$

где  $c = \varepsilon c_0$  – коэффициент излучения серого тела, Вт/(м<sup>2</sup>К<sup>4</sup>);  $T$  – температура тела, К.

Для случая, когда имеет место теплообмен излучением в замкнутой системе, состоящей из двух серых тел, разделенных лучепрозрачной средой (рис. 1) тепловой поток результирующего излучения рассчитывают по формулам:

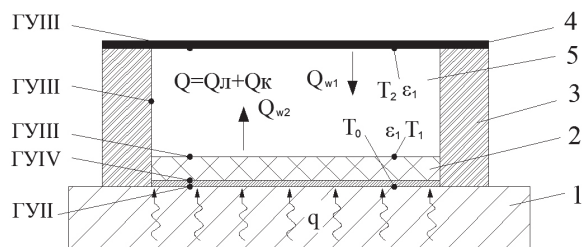
$$\begin{aligned} Q_{w,1} &= \varepsilon_{\text{пр}} \sigma_0 (T_2^4 - T_1^4) \varphi_{21} F_2, \\ Q_{w,2} &= \varepsilon_{\text{пр}} \sigma_0 (T_1^4 - T_2^4) \varphi_{12} F_1 \end{aligned} \quad (4)$$

или

$$\begin{aligned} Q_{w,1} &= c_{\text{пр}} \left[ \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 \right] \varphi_{21} F_2, \\ Q_{w,2} &= c_{\text{пр}} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varphi_{12} F_1, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенная степень черноты в системе двух тел;  $T_1$  и  $T_2$ ,  $F_1$  и  $F_2$  – абсолютные температу-

ры и площади поверхностей теплообмена первого и второго тела;  $\varphi_{12}$  и  $\varphi_{21}$  – угловые коэффициенты излучения, которые показывают, какая доля энергии полусферического излучения попадает с одного тела на другое.



**Рис. 1.** Предлагаемая схема измерений: 1 – источник стационарного теплового потока; 2 – слой исследуемого покрытия, нанесенного на медную пластину, с известной толщиной и коэффициентом теплопроводности; 3 – теплоизолятор (пенопласт); 4 – слой материала с известной степенью черноты; 5 – диатермичная среда (воздух)

**Fig. 1.** Proposed measurement scheme: 1 is the source of steady heat flow; 2 is the layer of the coating, applied on a copper plate, with the known thickness and thermal conductivity coefficient; 3 is the insulator (polystyrene); 4 is the layer of material with a certain emissivity factor; 5 is the diathermancy environment (air)

Для замкнутой системы (рис. 1) из закона сохранения энергии следует равенство:

$$Q_{w,2} = -Q_{w,1}. \quad (5)$$

С учетом того, что источник теплоты (1, рис. 1) находится в стационарном режиме и между слоем медной пластины с нанесенным утепляющим слоем краски формируются граничные условия 2-го рода (ГУ II), то вычисление удельного теплового потока в представленной системе можно выполнить по зависимости

$$q_u = \frac{\Delta T_u}{\frac{d_u}{\lambda_{effu}} - 2R_L}, \quad (6)$$

где  $d_u$  – толщина образца в процессе испытания, м;  $\Delta T_u$  – разность температур на поверхности медной пластины и испытуемого образца, °С ( $\Delta T_u = T_0 - T_1$ );  $R_L$  – термическое сопротивление медной пластины с нанесенным на нее образцом краски, (м<sup>2</sup>·°С)/Вт. Такая замена является корректной и не противоречит теории исследования тепловых процессов [28].

Так как на границе раздела слоя медной пластины и нанесенной краски слой воздуха отсутствует, то принимаем граничные условия 4-го рода (ГУ IV). Считаем, что вся теплота переходит в слой краски.

На границах поверхностей покрытия, эталонного материала и теплоизолятора приняты граничные условия 3-го рода (ГУ III). В таком случае тепловой поток от покрытия к эталонному образцу будет являться суммой теплоты, переданной конвекцией, и теплоты, переданной за счет излучения

$Q_{w,2} = Q_k + Q_d$ . Так как система тел (рис. 1) является замкнутой, то считаем, что конвекция за счет «боковых», горизонтальных движений воздуха отсутствует. При свободной конвекции значение коэффициента конвективной теплоотдачи (для расчета соответствующего количества теплоты  $Q_k$ ) может быть вычислен через критерий Нуссельта  $Nu$ .

Кроме того, считаем, что весь тепловой поток поступает с образца 2 на эталонный материал 4 (рис. 1) и площади указанных объектов равны.

С учетом сделанных допущений приведенная степень черноты в системе тел будет рассчитываться по зависимостям:

$$\begin{aligned} \epsilon_{np} &= \frac{q}{\sigma_0(T_1^4 - T_2^4)}, \\ \epsilon_{np} &= \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1\right)}, \end{aligned} \quad (7)$$

$\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  – интегральные степени черноты первого и второго тела.

Следовательно, интегральная степень черноты теплоизолирующей краски будет рассчитываться по выражению

$$\epsilon_1 = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_{np}} - \frac{1}{\epsilon_2} + 1}. \quad (8)$$

Недостатком данного метода может являться необходимость располагать для проведения эксперимента коэффициентом теплопроводности слоя исследуемой теплоизолирующей краски.

#### Порядок эксперимента

Для проведения эксперимента авторами был рассмотрен перечень наиболее известных фирм-производителей жидких теплоизолирующих покрытий.

На строительном рынке России можно встретить достаточно большое количество жидких теплоизоляционных покрытий (например, mascoat, tsmceramic, thermalcoat, Изоллат, Астратек, Альфатек, Теплокотт, Корунд и т. п.).

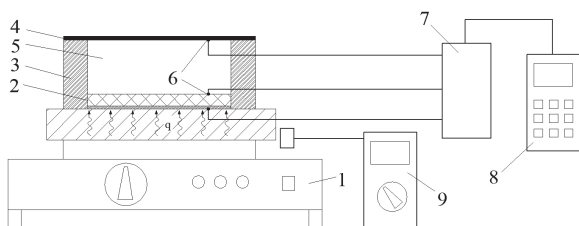
Для исследований были выбраны два образца жидких утеплителей – Изоллат и Теплометт (далее – Образец № 1 и Образец № 2). Некоторые характеристики образцов приведены в таблице.

Производители теплоизоляционных красок зачастую не предоставляют полную информацию о физико-химическом составе производимых ими теплоизолирующих покрытий, поэтому данные о составе теплоизолирующих красок исследуемых образцов были получены с официальных сайтов заводов-изготовителей. В состав красок входят: микросферы стеклокерамические, связующие, диспергаторы, наполнители, пигменты, разбавители. Как правило, поставщики не приводят процентного соотношения ингредиентов.

**Таблица.** Некоторые заявленные характеристики экспериментальных образцов

**Table.** Specifications of the experimental samples

Наименование характеристики Characteristic	Ед. измерения Unit	Образец Sample	
		№ 1	№ 2
Цвет покрытия Coat color		Белый/White	
Теплопроводность Heat conductivity	Вт/(м·°C) W/(m·°C)	0,0011	0,002–0,007
Плотность Density	кг/м³/kg/m³	390	280
Паропроницаемость Vapor permeability	мг/(м·ч·Па) mg/(m·h·Pa)	0,012	
Водопроницаемость Water conductivity	кг/(ч·м·0,1 ати) kg/(h·m·0,1 atmg)	менее 30 less than 30	
Тепловосприятие Heat absorption	Вт/м·°C W/m·°C	1,78	
Теплоотдача Heat transfer		1,58	
Блеск покрытия Coating shine	%	7,4	7,1



**Рис. 2.** Принципиальная схема измерительного комплекса: 1 – источник стационарного теплового потока; 2 – слой исследуемого покрытия, нанесенного на медную пластину, с известной толщиной и коэффициентом теплопроводности; 3 – теплоизолятор (пенопласт); 4 – слой материала с известной степенью черноты; 5 – диатермичная среда (воздух); 6 – термопары между слоями; 7 – коммутатор; 8 – прибор измерения «Терем-4.0»; 9 – радиометр неселективный «АРГУС-03» (показан условно)

**Fig. 2.** Diagram of the measuring system: 1 is the source of steady heat flow; 2 is the layer of the coating, applied on a copper plate, with the known thickness and thermal conductivity coefficient; 3 is the insulator (polystyrene); 4 is the layer of material with a certain emissivity factor; 5 is the diathermancy environment (air); 6 are the thermocouples between the layers; 7 is the switching device; 8 is the measuring device «Terem-4.0»; 9 is the nonselective radiometer «ARGUS-03» (shown schematically)

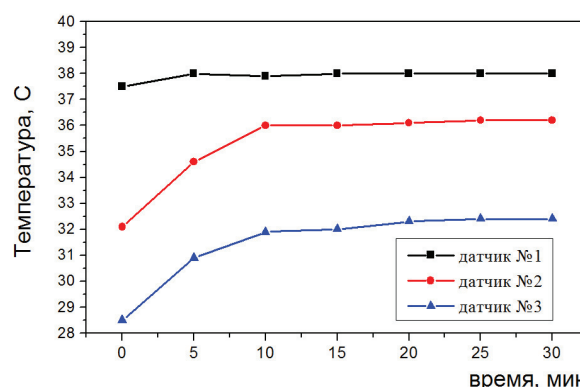
Для проведения эксперимента был разработан измерительный комплекс, который включал в себя:

1. Устройство для тестирования образцов (рис. 2).
2. Прибор марки «Терем-4.0» для измерения показаний от термопар.
3. Термопары «хромель-копелевые», изготовленные из проводов толщиной  $\delta=0,2$  мм.
4. Пластина из материала с известной степенью черноты (картон черного цвета,  $\varepsilon=0,945$ ).
5. Радиометр неселективный «АРГУС-03» (имеющий относительную погрешность до 5 %), который предназначен для уточнения количества

теплоты, излучаемой с поверхности исследуемого материала.

Значения коэффициентов теплопроводности образцов теплоизолирующих покрытий были определены заранее [7, 8]. Теплопроводность медной пластины толщиной  $\delta=0,5$  мм равна:  $\lambda=384$  Вт/(м·°C). Температура воздуха в помещении при проведении эксперимента была равна 24 °C, относительная влажность воздуха  $\varphi=48$  %.

Для стабилизации показаний прибора в процессе его «прогрева» и перевода теплового потока в стационарный режим (выравнивания тепловых потоков) были проведены контрольные замеры динамики показаний прибора по 3-м датчикам термомпар в течение 0,5 часа с шагом проведения измерения 5 мин (рис. 3).



**Рис. 3.** Показания прибора по данным от 3-х датчиков термомпар по времени

**Fig. 3.** Readings of the unit according to the data of three thermocouple detectors by time

Из представленного графика видно, что показания прибора выходили на стационарный уровень через 20 мин после начала его работы, что было учтено при проведении экспериментов.

Для проверки адекватности разработанного устройства для измерения интегральной степени черноты теплоизолирующих красок вначале были произведены поверочные работы. При вычислении теплового потока с поверхности исследуемого покрытия на него помещался датчик радиометра, который показывал излучаемый тепловой поток. Расхождение при этом не превышало 5 %

Полученные данные свидетельствуют, что погрешность по данному методу не превышает допустимой погрешности, что говорит о корректности выбранной схемы исследований.

#### Анализ результатов эксперимента

Для анализа динамики изменения интегральной степени черноты в зависимости от температуры образцов краски Образец № 1 и Образец № 2 тестировались в разных температурных режимах при различном тепловом потоке. Полученные результаты представлены на рис. 4. Как видно из рис. 4, средняя величина степени черноты с увеличением температуры образца краски также увели-

чивается. Данное наблюдение удовлетворительно согласуется с аналогичными результатами, представленными в [28, 29].

Как показал эксперимент, у Образца № 1 средняя степень черноты  $\varepsilon=0,89$ , у Образца № 2  $\varepsilon=0,87$  в пределах температур 35...65 °С. Дальнейшее увеличение температуры нецелесообразно, так как исследуемые образцы были предназначены для окрашивания трубопроводов систем отопления, где температурный режим эксплуатации ограничен 100 °С. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, полученными другими авторами [6].

Расчет погрешности измерений проводился по зависимостям (4)–(6).

$$\bar{A} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n}, \quad (9)$$

где  $A$  – измеряемая величина;  $\bar{A}$  – среднее значение измеряемой величины;  $\Delta\bar{A}$  – абсолютная погрешность среднего значения измеряемой величины, определяемая по формуле

$$\Delta\bar{A} = t_{y,n-1} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - \bar{A})^2}{n-1}}, \quad (10)$$

где  $t_{y,n-1}$  – коэффициент Стьюдента (при  $t_{95\%,22}=2,074$ ).

Относительная погрешность среднего значения измеряемой величины рассчитывается по зависимости

$$\varepsilon = \frac{\Delta\bar{A}}{\bar{A}}. \quad (11)$$

Погрешность измерения составила:  $\varepsilon=0,01\%$ .

Итоговая погрешность определения теплопроводности с учетом погрешности прибора измерения тепловых потоков (5%), измерения датчиками термопар с помощью прибора «Терем 4.0» (1%) составила 6,01%.

#### Заключение

В результате проделанной работы была экспериментально определена интегральная степень черноты ( $\varepsilon$ ) сверхтонких жидких композиционных теплоизолирующих покрытий. Для Образца № 1  $\varepsilon=0,89$ , для Образца № 2  $\varepsilon=0,87$  в пределах температур 35...65 °С. Сравнивая полученные результаты с имеющимися данными, можно сделать вывод, что степень черноты исследуемых материалов сопоставима по своим показателям, например, с асбестовой бумагой ( $\varepsilon=0,93$ ) или гипсом ( $\varepsilon=0,9$ ). Также полученная степень черноты весьма близка, например, к лаку белому эмалевому, нанесенному на металлический лист ( $\varepsilon=0,906$ ). Вместе с тем утверждения производителей утепляющих покрытий о высокой отражающей способности этих

материалов являются на данный момент преждевременными.

Авторы статьи допускают, что расхождение между экспериментальными характеристиками и заявленными возможно вследствие того, что в качестве образцов для исследований были выбраны краски с наполнением газозаполненными микросферами, а не вакуумозаполненными (некоторые производители указывают на это различие), так как их теплофизические свойства будут не одинаковы.

Несмотря на это, подобные жидкие теплоизоляционные покрытия представляют собой большой интерес для строителей, так как позволяют утеплять объекты сложной геометрической формы (корпуса задвижек, сложные узлы и т. п.), что в ряде случаев делает их практически незаменимыми.

Данное исследование не претендует на роль «окончательного» и скорее направлено на предпосылки к дальнейшему изучению теплоизоляционных свойств современных жидких композиционных теплоизолирующих покрытий, так как их теплофизические свойства на сегодняшний день еще недостаточно изучены.

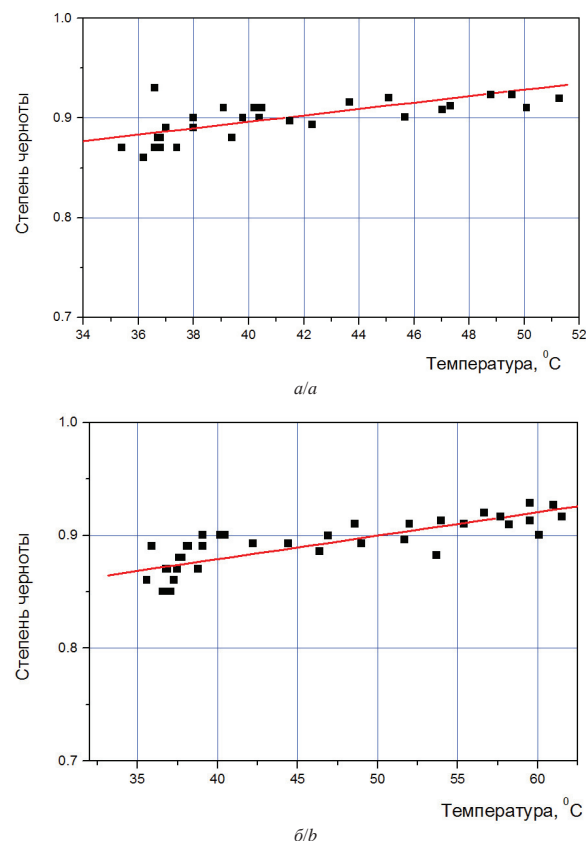


Рис. 4. Результаты эксперимента по определению степени черноты образцов краски: а) Образец № 1; б) Образец № 2

Fig. 4. Results of the experiment on determining paint sample emissivity factor: a) sample no. 1; b) sample no. 2



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экспериментальное определение коэффициентов теплопроводности и эффективности сверхтонких теплоизоляционных покрытий / И.О. Манешев, Ю.И. Правник, Р.А. Садыков, И.А. Сафин, С.А. Еремин // Известия КазГАСУ. – 2014. – № 1 (23). – С. 135–142.
2. Барболина М.С., Павлов М.В. Определение коэффициента теплопроводности жидкой тепловой изоляции при нестационарном тепловом режиме // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки. – Новосибирск: Изд. АНС «СибАК». – 2016. – № 3 (39). URL: <http://sibac.info/studentconf/tech/xl/48955> (дата обращения: 15.04.2016).
3. Сверхтонкая теплоизоляция «Броня» // Волгоградский инновационный ресурсный центр. URL: <http://www.nano34.ru> (дата обращения: 19.03.2016).
4. Севастьянова А.А., Квитко Г.В., Иост М.К. Жидкий утеплитель – будущее изоляции // Вопросы науки. – 2014. – Т. 2. – С. 119–122.
5. Ширинян В.Т. Поход жидко-керамического «супертеплоизоляционного» покрытия по тепловым сетям России // Новости теплоснабжения. – 2007. – № 9. – С. 46–51.
6. О реальных физических свойствах и возможностях «теплоизолирующих» красок / Л.В. Декуша, Т.Г. Грищенко, Л.И. Воробьев, А.Г. Мазуренко, В.И. Шаповалов // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т. 28. – № 5. – С. 93–96.
7. Анисимов М.В., Рекунов В.С. Экспериментальное определение коэффициента теплопроводности сверхтонких жидких композиционных теплоизолирующих покрытий // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 9. – С. 15–20.
8. The empirical evaluation of thermal conduction coefficient of some liquid composite heat insulating materials // M.V. Anisimov, V.S. Rekunov, M.N. Babuta, Nguyen T.H.B. Lien // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – V. 012014. – № 5. DOI: 10.1088/1757-899X/116/1/012014.
9. Способ измерения степени черноты: пат. Рос. Федерация № 2510491; заявл. 11.01.2012; опубл. 27.03.2014, Бюл. № 4. – 5 с.
10. Способ и устройство для определения теплофизических характеристик тонкослойных материалов: пат. Рос. Федерация № 2132549; заявл. 14.01.1997; опубл. 25.03.1999, Бюл. № 3. – 10 с.
11. Способ определения теплофизических свойств твердых тел: пат. Рос. Федерация № 1766172; заявл. 14.09.1989; опубл. 09.07.1990, Бюл. № 8. – 7 с.
12. Способ измерения степени черноты твердых тел: пат. Рос. Федерация № 770333; заявл. 19.05.1978; опубл. 31.05.1979, Бюл. № 12. – 15 с.
13. Способ определения теплофизических характеристик пенополиуретанов: пат. Рос. Федерация № 2295720; заявл. 17.02.2005; опубл. 20.03.2007, Бюл. № 14. – 8 с.
14. Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов: пат. Рос. Федерация № 2192000; заявл. 04.09.2000; опубл. 27.10.2002, Бюл. № 2. – 7 с.
15. Способ определения теплофизических характеристик материалов и устройство для его реализации: пат. Рос. Федерация № 2096770; заявл. 27.07.1994; опубл. 20.11.1997, Бюл. № 11. – 6 с.
16. Способ определения теплофизических характеристик материалов. Патент РФ № 2224245; заявл. 02.04.2002; опубл. 20.02.2004, Бюл. № 12. – 4 с.
17. Salvaggio C., Miller D.P. Temporal variations in the apparent emissivity of various materials // Proc. of SPIE. – Bellingham, WA, 2004. – V. 5425. DOI: 10.1117/12.546321.
18. Fronapfel E.L., Stolz B.J. Emissivity Measurements of Common Construction Materials // InfraMation. – 2006. – V. 2. – № 11. – P. 22–30.
19. Dewitt D.P., Nutter G.D. Theory and practice of radiation thermometry. – New York: John Wiley & Sons, 1988. – 248 p.
20. Nerry F., Labe J., Stoll M.P. Emissivity signatures in the thermal infrared band for remote sensing: calibration procedure and method of measurement // Applied Optics. – 1988. – V. 27. – P. 758–764.
21. The Spectral Emissivity of Surface Layers currently applied in Blackbody radiations covering the Spectral range from 0,9 to 20 micron – an International comparison / M. Battuello, S. Clausen, J. Hameury, P. Bloembergen // Proc. of TEMPMEKO99. – New York, 1999. – P. 601–606.
22. High emissivity coatings for high temperature application: progress and prospect / Xiaodong He, Yibin Li, Lidong Wang, Yue Sun, Sam Zhang // Thin Solid Films. – 2009. – V. 14. – № 7. – P. 5120–5129.
23. Neuer G., Jaroma-Weiland G. Spectral and Total Emissivity of High-Temperature Materials // International Journal of Thermophysics. – 1998. – V. 19. – № 3. – P. 145–155.
24. Watson K. Two-temperature method for measuring emissivity. – Denver, USA: U.S. Geological Survey, 2003. DOI: 10.1016/0034-4257(92)90095-2.
25. Le Yuan, Xiaolong Weng, Longjiang Deng. Influence of binder viscosity on the control of infrared emissivity in low emissivity coating // Infrared Physics & Technology. – January 2013. – V. 56. – P. 25–29.
26. Chang-Da Wen, Issam Mudawar. Emissivity characteristics of roughened aluminum alloy surfaces and assessment of multispectral radiation thermometry (MRT) emissivity models // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2004. – V. 47. – Iss. 17–18. – P. 3591–3605.
27. Biassetto L., Manzolaro M., Andrighetto A. Emissivity measurements of opaque gray bodies up to 2000 °C by a dual-frequency pyrometer // Eur. Phys. J. – 2008. – № 14. – P. 167–171.
28. Прошкин С.С. Измерение коэффициента излучения полимерных композитных материалов // Вестник МАХ. – № 3. – 2015. – С. 73–78.
29. Домбровский Л.А. Моделирование теплового излучения полимерного покрытия, содержащего полые микросферы // Теплофизика высоких температур. – 2005. – Т. 43. – № 1. – С. 1–11.

Поступила 15.04.2016 г.

## Информация об авторах

**Анисимов М.В.**, кандидат технических наук, доцент кафедры охраны труда и окружающей среды Томского государственного архитектурно-строительного университета.

**Лычагин Д.В.**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры минералогии и геохимии Национального исследовательского Томского государственного университета.

**Рекунов В.С.**, кандидат технических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения Томского государственного архитектурно-строительного университета.

**Таалайбеков Ж.Т.**, студент кафедры охраны труда и окружающей среды Томского государственного архитектурно-строительного университета.



UDC 536.331

## EXPERIMENTAL DEFINITION OF INTEGRATED EMISSIVITY FACTOR OF ULTRATHIN FLUID COMPOSITE HEAT INSULATING COATINGS

**Maksim V. Anisimov<sup>1</sup>,**

teploproekt@list.ru

**Dmitry V. Lychagin<sup>2</sup>,**

dmitrylychagin@mail2000.ru

**Vitaly S. Rekunov<sup>1</sup>,**

Rekunovs@mail.ru

**Zhanibek T. Taalaybekov<sup>1</sup>,**

jtaalaibekov@mail.ru

<sup>1</sup> Tomsk State University of Architecture and Building,  
2, Solyanaya square, Tomsk, 634003, Russia.

<sup>2</sup> National Research Tomsk State University,  
36, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the research is determined by the contemporary world tendencies in the sphere of energy and resources saving policy that involves the necessity of more rational environmental management including the field of construction. The usage of modern heat insulation materials will allow solving the problem of the rational exploitation of the Earth mineral resources. The evaluation of different modern heat-insulating coats applicability represents the topical problem that involves the necessity to check by experiment the values of the total emissivity of the ultrathin liquid composition heat-insulating coating and detect their true values.

**The aim** of the research is to develop measuring technique and design a laboratory research installation; to carry out the experiment on defining the values of emissivity factor of ultrathin liquid composite coatings by the developed method.

**Research methods:** empirical definition of the coating emissivity factor using the proposed laboratory device, including the system of «grey» bodies, gauges of thermocouples and a source of a stationary thermal stream.

**Results.** The authors have determined by experiment the integrated emissivity factor of ultrathin liquid composite heat insulating coatings. It is  $\varepsilon=0,89$  for «the sample no. 1», and it is  $\varepsilon=0,87$  for the «sample no. 2» within 35–65 °C. The measuring error was calculated. The actual emissivity factor of the studied samples was higher than the declared one. Despite this, similar liquid heat insulating coatings are of great interest to builders as they allow warming objects of complex geometrical shapes (valve chambers, complex assemblies, etc.) and in some cases they become almost irreplaceable. The proper account of paint heating qualities will allow avoiding the above-limit growth of heat loss in isolated pipelines with heat transfer materials or building structures, and protect them from possible thawing in the period of subzero weather.

### Key words:

Experiment, thermal radiation, emissivity factor, heat insulation, liquid ultrathin coatings.

### REFERENCES

- Maneshev I.O., Pravnik Yu.I., Sadykov P.A., Safin I.A., Eremin S.A. Experimental determination of thermal conductivity and thermal insulation efficiency of ultrathin coatings. *News of the KSUAE*, 2013, no. 1 (23), pp. 135–142. In Rus.
- Barbolina M.S., Pavlov M.V. Opredelenie koefitsienta teploprovodnosti zhydkoy teplovy izolyatsii pri nestatsionarnom teplovom rezhime [Determination of thermal conductivity coefficient of liquid thermal insulation at non-stationary thermal regime]. *Nauchoe soobshchestvo studentov XXI stoletiya. Tekhnicheskie nauki*, 2016, no. 3 (39). Available at: URL: <http://sibac.info/stud-conf/tech/xl/48955> (accessed 15 April 2016).
- Sverkhtonkaya teploizolyatsiya «Bronya» [Ultra-thin insulation Bronya]. Available at: <http://www.nano34.ru> (accessed 19 March 2016).
- Sevastianova A.A., Kvitko G.V., Iost M.K. Zhidkiy uteplitel – buduyushchie izolyatsii [Liquid insulation – insulation of the future]. *Voprosy nauki*, 2015, vol. 2, pp. 119–122.
- Shirinyan V.T. Pokhod zhidko-keramicheskogo «super teplo izolyatsionnogo» pokrytiya po teplovym setyam Rossii [Flow of liquid ceramic «super heat-insulating» coating on the Russian heat networks]. *Novosti teplosnabzheniya*, 2007, no. 9, pp. 46–51.
- Dekusha L.B., Grishchenko T.G., Vorobyov L.I., Mazurenko A.G., Shapovalov V.I. O realnyh fizicheskikh svoystvakh i vozmozhnostyakh «teploizoliruyushchikh» krasok [On real physical properties and possibilities of «insulating» paints]. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2006, vol. 28, no. 5, pp. 93–96.
- Anisimov M.V. Experimental determination of thermal conductivity coefficient of ultrathin liquid composite thermal barrier coatings. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 9, pp. 15–20. In Rus.
- Anisimov M.V., Rekunov V.S., Babuta M.N., Nguyen T.H.B. Lien. The empirical evaluation of thermal conduction coefficient of some liquid composite heat insulating materials. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2016, vol. 012014116, no. 5. DOI: 10.1088/1757-899X/116/1/012014.
- Lapovok E.V., Penkov M.M., Slinchenko D.A., Urtmintsev I.A., Khankov S.I. Sposob izmereniya stepeni chernoty [The way to measure emissivity factor]. Patent RF, no. 2510491, 2014.
- Bronnikov V.A., Volga V.I. Sposob i ustroystvo dlya opredeleniya teplofizicheskikh kharakteristik tonkosloynnykh materialov [Method and device for determining thermophysical characteristics of thin-layer materials]. Patent RF, no. 2132549, 1999.

11. Fokin S.I., Prosuntsev P.V., Sinkevich O.A., Kirillov V.N., Zuev A.V. *Sposob opredeleniya teplofizicheskikh svoystv tverdykh tel* [Method of determining thermophysical properties of solids]. Patent RF, no. 1766172, 1990.
12. Zhigalov V.N., Malkiel Zh.P. *Sposob izmereniya stepeni chernoty tverdykh tel* [A measure of solids emissivity factor]. Patent RF, no. 770333, 1979.
13. Obukhov V.V., Obukhova L.V. *Sposob opredeleniya teplofizicheskikh kharakteristik penopoliuretanov* [Method of determining thermophysical characteristics of polyurethane foams]. Patent RF, no. 219200, 2007.
14. Klebanov M.G., Obukhov V.V., Fesenko T.A. *Sposob nerazrushayushchego kontrolya teplofizicheskikh kharakteristik materialov* [Method of nondestructive control of thermophysical characteristics of materials]. Patent RF, no. 2192000, 2002.
15. Boyarinov A.E., Glinkin E.I., Chekulaev D.E., Mishchenko S.V. *Sposob opredeleniya teplofizicheskikh kharakteristik materialov i ustroystvo dlya ego realizatsii* [A method of determining the thermal properties of materials and device for its realization]. Patent RF, no. 2096770, 1997.
16. Vlasov A.B. *Sposob opredeleniya teplofizicheskikh kharakteristik materialov* [Method of determining thermophysical characteristics of materials]. Patent RF, no. 2224245, 2004.
17. Carl S., David P.M. Temporal variations in the apparent emissivity of various materials. *Proceedings of SPIE*. Bellingham, WA, 2004. Vol. 5425. DOI: 10.1117/12.546321.
18. Edward L.F., Bradley J.S. *Emissivity Measurements of Common Construction Materials*. New York, 2006, vol. 2, no. 11, pp. 22–30.
19. Dewitt D.P., Nutter G.D. *Theory and practice of radiation thermometry*. New York, John Wiley & Sons, 1988. 248 p.
20. Nerry F., Labed J., Stoll M.P. Emissivity signatures in the thermal infrared band for remote sensing: calibration procedure and method of measurement. *Applied Optics*, 1988, vol. 27, pp. 758–764.
21. Battuello M., Clausen S., Hameury J., Bloembergen P. The Spectral Emissivity of Surface Layers currently applied in Blackbody radiations covering the Spectral range from 0,9 to 20 micron – an International comparison. *TEMPMEKOr99 Proceedings*. New York, 1999. pp. 601–606.
22. Xiaodong He, Yibin Li, Lidong W., Yue S., Sam Zh. High emissivity coatings for high temperature application: progress and prospect. *Thin Solid Films*, 2009, vol. 14, no. 7, pp. 5120–5129.
23. Neuer G., Jaroma-Weiland G. Spectral and Total Emissivity of High-Temperature Materials. *International Journal of Thermophysics*, 1998, vol. 19, no. 3, pp. 145–155.
24. Watson K. *Two-temperature method for measuring emissivity*. Denver, USA, U.S. Geological Survey, 2003. DOI: 10.1016/0034-4257(92)90095-2.
25. Le Y., Xiaolong W., Longjiang D. Influence of binder viscosity on the control of infrared emissivity in low emissivity coating. *Infrared Physics & Technology*, 2013, vol. 56, pp. 25–29.
26. Chang-Da W., Issam M. Emissivity characteristics of roughened aluminum alloy surfaces and assessment of multispectral radiation thermometry (MRT) emissivity models. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, vol. 47, pp. 3591–3605.
27. Biasetto L., Manzolaro M., Andrighetto A. Emissivity measurements of opaque gray bodies up to 2000 °C by a dual-frequency pyrometer. *Eur. Phys. J.* 2008, vol. 38, no. 14, pp. 167–171.
28. Proshkin S.S. Izmerenie koeffitsienta izlucheniya polimernykh kompozitnykh materialov [Measurement of emissivity of polymer composite materials]. *Vestnik MAX*, 2015, no. 3, pp. 73–78.
29. Dombrovsky L.A. Modelirovanie teplovogo izlucheniya polimernogo pokrytiya soderzhashchego polye mikrosfery [Modeling of thermal radiation of polymer coating containing hollow microspheres]. *Teplofizika vysokikh temperatur*, 2005, vol. 43, no. 1, pp. 1–11.

Received: 15 April 2016.

#### Information about the authors

**Maksim V. Anisimov**, Cand. Sc., associate professor, Tomsk State University of Architecture and Building.

**Dmitry V. Lychagin**, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk State University.

**Vitaly S. Rekunov**, Cand. Sc., associate professor, Tomsk State University of Architecture and Building.

**Zhanibek T. Taalaybekov**, student, Tomsk State University of Architecture and Building.