УДК:699.86

**Оценка теплоотражающих свойств тонкопленочных покрытий, содержащих микросферы**

***Журавлев А.А., Захаров В.П., Третьяков В.А.***

***Zhuravlev A.A., Zaharov V.P., Tretyakov V.A.***

***Аннотация:*** *В статье приведены результаты исследования теплофизических свойств тонкопленочных теплозащитных покрытий, имеющих неоднородную структуру и содержащих микросферы диаметром несколько десятков микрон. Актуальность данной работы обусловлена разноречивыми данными (в том числе и экспериментальными) по величине теплопроводности таких покрытий. В частности, в них не учитывался процесс отражения теплового (в инфракрасном диапазоне) излучения на микросферах в оптически неоднородной среде.*

*В настоящей работе была поставлена и решена задача по оценке влияния теплоотражающих свойств оптически неоднородной среды на ее теплозащитные свойства. В качестве объекта исследования были выбраны тонкопленочные покрытия, содержащие различного рода микросферы. На основании анализа существующих теоретических и экспериментальных данных были проведены расчеты, свидетельствующие о необходимости учета теплоотражающих свойств покрытий.*

*В военной сфере такие покрытия могут использоваться как для маскировки теплового (инфракрасного) излучения объектов военной инфраструктуры, так и для дополнительной тепловой защиты зданий и сооружений в северных регионах.*

***Abstract:*** *The results of the study of thermal properties of thin-skin heat-shielding coatings having a heterogeneous structure and containing microspheres of a diameter about several tens of microns. The relevance of this work is due to contradictory data (including experimental) for the thermal conductivity of these coatings. In particular, they do not include a process of reflection of thermal (infrared) radiation on the microspheres in an optically inhomogeneous medium.*

*In the present work it was formulated and solved the problem of assessing the impact of heat-reflective optical properties of an inhomogeneous medium to its heat-shielding properties. Various types of microspheres were selected as the object of study thin-skin coatings. Calculations were produced on the base of the analysis of existing theoretical and experimental data, indicating the need to consider the properties of heat-reflecting coatings.*

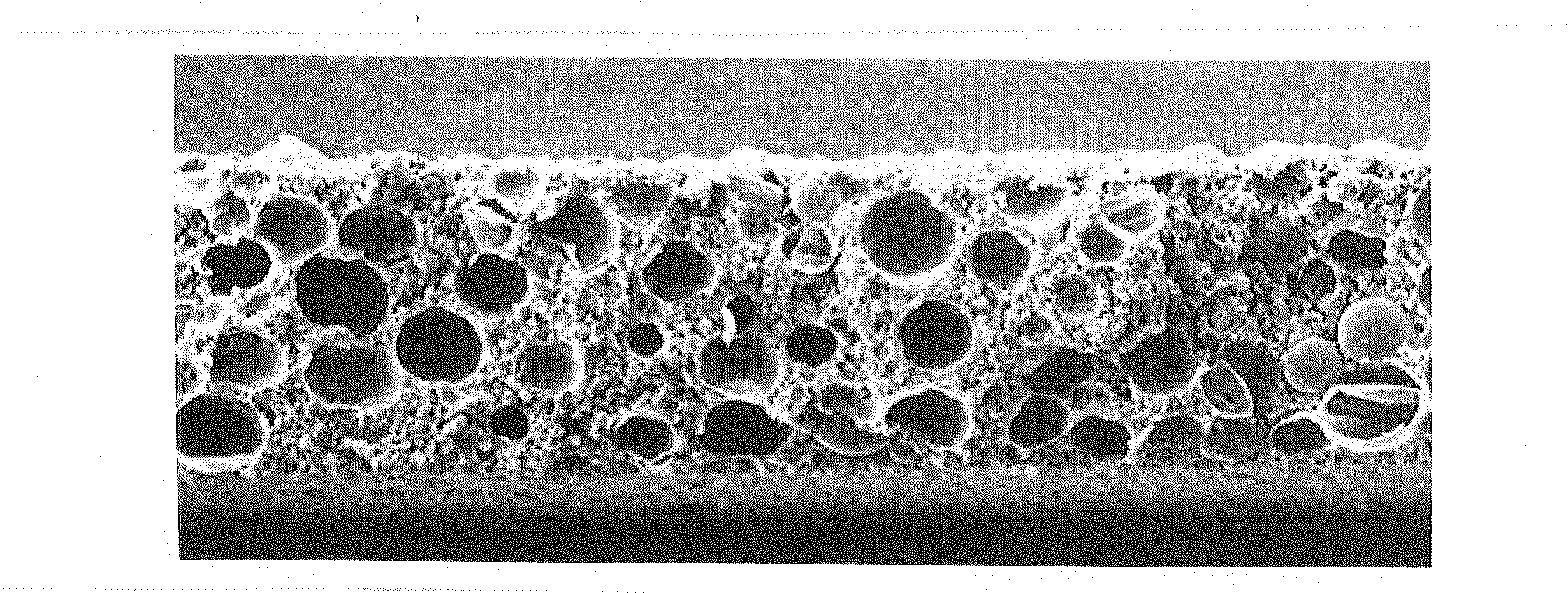
*In the military sphere such coatings can be used both for masking the thermal (infrared) radiation of military infrastructure facilities and for additional thermal protection of buildings and structures in the northern regions.*

***Ключевые слова:*** *тонкопленочные теплозащитные покрытия, микросферы, теплопроводность, отражение теплового (инфракрасного) излучения, теплозащитные свойства.*

***Keywords:*** *thin-skin heat-shielding coatings, microspheres, thermal conductivity, reflection of thermal (infrared) radiation, heat-shielding properties.*

1. ***Общие сведения***

В течение двадцати лет во многих странах активно ведутся исследования теплофизических свойств тонкопленочных теплозащитных покрытий (ТТП), представляющих собой компаунд на основе акриловых (или аналогичных красок) с добавлением микросфер (керамических, стеклянных, силиконовых и др.). Покрытия именуются тонкопленочными, так как их слой на поверхности объекта (например, строительной конструкции) составляет от 0,5 до 3 мм. Микросферы имеют размеры в несколько десятков микрон (20-80 мкм) и могут быть как газонаполненными, так и вакуумированными. Структура покрытия показана на рис. 1.



*Рис. 1. Микропористая структура тонкопленочного теплозащитного покрытия.*

Такие покрытия могут наноситься на наружные поверхности стен или покрытий зданий (в ряде случаев – на внутреннюю поверхность стены или кровли) и выполнять роль дополнительного теплозащитного слоя. Некоторые виды покрытий с микросферами, обладая теплоотражающими свойствами, снижают излучательную способность поверхности, а, следовательно, уменьшают тепловые потери здания через ограждающие конструкции (стены и покрытие) в зимнее время и не пропускают внутрь здания избыточное тепло в жаркий период года.

Покрытия из микросфер и связующего по своей сути являются оптической системой, активно работающей в области теплового (инфракрасного) излучения. При этом излучательная способность поверхности зависит от многих факторов: размеров и концентрации микросфер, оптических свойств связующего, состояния атмосферы в данный период времени и многих других характеристик.

Как известно, при расчетах теплозащиты учитываются 2 вида теплопередачи: конвективный теплообмен и теплопроводность. Первый определяет процессы теплообмена воздушной среды в помещении с внутренней поверхностью стены (или покрытия), а также наружной стены с внешней воздушной средой. Второй вид теплопередачи – теплопроводность играет роль в процессах передачи тепловой энергии внутри ограждающей конструкции (стены или покрытия).

Третий вид теплопередачи – перенос тепла излучением – в расчет не принимается, так как наружные поверхности стен и покрытий эффектом отражения тепловой энергии не обладают.

Следует отметить, что при расчете необходимого уровня теплозащиты тонкопленочные покрытия самостоятельной роли не выполняют, они могут повышать теплозащиту ограждающей конструкции. В этом можно убедиться на примере такого покрытия как Краска теплоотражающая специальная ВД-АК-518. Теплопроводность Краски варьируется в диапазоне 0,2 – 0,6 Вт/(м× оС) в зависимости от концентрации микросфер в компаунде. Данные о теплозащитных свойствах Краски приведены в табл. 1.

Термическое сопротивление материалов рассчитывается как:

*Ri* = *δi /* *λi* , м2× оС /Вт, (1)

где *δi* – толщина *i* –ого слоя теплозащитного материала, м;

*λi* – теплопроводность материала, Вт/(м× оС).

***Таблица 1***

**Величина термического сопротивления Краски ВД-АК-518**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Толщина слоя краски, мм | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 | 3,0 |
| Величина м2×°С/Вт (при 0,06 Вт/(м× оС) | **0,008** | **0,017** | **0,025** | **0,033** | **0,042** | **0,05** |
| Величина м2× °С/Вт (при 0,02 Вт/(м× оС) | **0,025** | **0,05** | **0,075** | **0,1** | **0,125** | **0,15** |

Как показывает анализ таблицы, Краска не может обеспечить высокой теплозащиты конструкции по теплопроводности, так как ее теплозащитные свойства составляют не более 5% от требуемого термического сопротивления стен здания.

1. ***Учет радиационной составляющей***

Однако в реальности тепловой поток с наружной поверхности стены в окружающее пространство имеет две составляющие /1, 2/:

* конвективную, обусловленную локальной передачей тепловой энергии с поверхности стены наружному воздуху. Удельный тепловой поток равен:

, (2)

где αн - коэффициент конвективной передачи (теплоотдачи) с поверхности стены; *Тнп* и *Тн* – соответственно температура наружной поверхности стены и наружного воздуха.

* радиационную, являющуюся результатом дистанционной передачи тепла с поверхности стены окружающим объектам за счёт инфракрасного излучения:

- (3)

где *ε* – излучательная способность поверхности стены, σ0 = 5,67Вт/(м2×К4) – постоянная Стефана-Больцмана, *Тrz* - эффективная радиационная температура окружающего пространства.

Таким образом, плотность потока тепловых потерь с поверхности стены определяется следующей формулой:

- (4)

Здесь основную трудность представляет вычисление температуры Тrz , которая во многом определяется радиационной температурой высоких слоёв атмосферы Тr, а та, в свою очередь, зависит от состояния атмосферы (облачность, влажность воздуха, запылённость и т.п.).

В литературе /3/ для средних широт приводится соотношения для определения среднестатистической радиационной температуры высоких слоёв атмосферы:

. (5)

Зависимость радиационной температуры от температуры окружающего воздуха представлена в табл. 2.

Поверхность стены обменивается энергией излучения не только с атмосферой, но и с поверхностью земли и другими объектами, имеющими свою радиационную температуру *Тz* , которая отличается от температуры атмосферы *Тr*.

***Таблица 2***

**Зависимость радиационной температуры от температуры окружающего воздуха**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 253 | 258 | 263 | 268 | 273 | 278 | 283 | 288 | 293 | 298 | 303 |
|  | 222 | 229 | 235 | 242 | 249 | 256 | 263 | 270 | 277 | 284 | 291 |

При этом для отдельно стоящего здания половина радиационной составляющей тепловых потерь приходится на радиационный теплообмен между стеной и атмосферой, а другая – на радиационный теплообмен между стеной и поверхностью земли /4/.

(  
 Приравнивая правые части (3) и (6) можно получить эффективную радиационную температуру окружающего пространства (атмосферы и поверхности земли):

(7)

В расчётах рекомендуется принимать, что радиационная температура равняется температуре окружающего воздуха *Тz*= *Тн*. С учётом последнего и соотношения (5) можно получить выражение для расчёта эффективной радиационной температуры окружающего пространства:

). (8)

Данная формула используется в методике расчёта сопротивления теплопередаче стены с покрытием «связующее - микросферы».

Следует учесть, что излучательная способность Краски значительно меньше излучательной способности поверхностей строительных материалов (0,92÷0,93), что приводит к сокращению радиационной составляющей теплопотерь и соответственно, к изменению структуры и уменьшению величины теплового потока с поверхности стены.

Необходимо определить количественное уменьшение тепловых потерь с поверхности стены при изменении излучательной способности наружной поверхности стены. Пусть поверхность стены имеет температуру *Тнп*и излучательную способность *ε0*. Тогда плотность теплового потока в соответствии с формулой (4) определяется соотношением:

- (9)  
  
После нанесения Краски, содержащей микросферы, с излучательной способностью при прочих равных условиях плотность теплового потока с поверхности стены становится равной:

- (10)

Относительная величина энергосберегающего эффекта определяется как:

. (11)

Если принять в качестве граничного условия на поверхности теплозащиты , то расчетная формула сводится к сравнению излучательных способностей поверхности ограждающей конструкции без Краски и поверхности с наружным слоем Краски:

. (12)

Учитывая излучательную способность ( Краски /5/ с концентрацией микросфер около 1÷3 % получим:

0,19.

Таким образом, применение Краски с теплоотражающими микросферами может дать теплосберегающий эффект около 20%.

Следует учитывать, что эффективность Краски по снижению процесса теплопередачи будет еще выше, так как необходимо будет учесть термическое сопротивление Краски (см. табл.1).

На основании построенной математической модели и анализа экспериментальных данных в работе /6/ приводятся значения эффективной степени черноты теплоотражающего покрытия с микросферами, которые могут достигать величин: 0,4 , а в ряде случаев (например, облачного неба) 0,3. В этом случае эффективность теплозащиты ограждающих конструкций возрастает до 3035%.

В отдельных случаях нанесение теплоотражающего покрытия на наружную поверхность стены или покрытия здания становится невозможным: к примеру, при использовании в качестве облицовки стен здания керамического облицовочного кирпича или применении вентилируемого фасада. Повышение теплозащитных свойств ограждающих конструкций может потребоваться из-за расчетных ошибок проектировщиков, несоответствия фактических теплозащитных свойств материалов заявленным показателям, изменения теплофизических свойств материалов во время строительства (например, за счет поглощения влаги).

В этих случаях возможно применение ТТП с теплоотражающими свойствами на внутренней поверхности ограждающей конструкции, что также приводит к суммарному повышению энергоэффективности ограждающей конструкции.

В этих условиях в отличие от предыдущей задачи следует рассматривать эффективный коэффициент теплоотдачи не на наружной, а на внутренней поверхности стены, учитывая влияние лучистой составляющей. Поэтому:

, (13)

где – соответственно конвективная и лучистая составляющие эффективного коэффициента теплоотдачи.

Результирующий удельный тепловой поток равен:

, (14)

где и – соответственно конвективная и радиационная составляющие результирующего теплового потока.

Конвективная составляющая вычисляется из:

. (15)

Лучистую составляющую теплового потока можно определить из:

, (16)

где - приведенный коэффициент излучения для условий внутри помещения; – коэффициент излучения абсолютно черного тела, равный 5,67; и – температуры внутреннего воздуха и внутренней поверхности стены соответственно, *К*.

Приведенный коэффициент излучения определяется как /7/:

. (17)

Здесь и – коэффициенты излучения внутреннего воздуха и внутренней поверхности стены соответственно. Следует учитывать, что воздух внутри помещения содержит водяные пары и вследствие этого представляет собой коэффициент излучения водяных паров.

В проведенных экспериментах /7/ были установлены коэффициенты излучения тонкопленочного теплоотражающего покрытия и приведенный коэффициент излучения . Погрешность измерений в экспериментальных исследованиях составила от 1,1 до 2,3%. Так, для ТТП с микросферами = 0,52, а = 0,34. Если добавить в микросферы алюминиевый пигмент, создающий дополнительный отражающий эффект, то = 0,4, а = 0,29.

Экспериментально было доказано, что теплоотражающее покрытие с микросферами способно снизить величину теплового потока на 17%, а применение на конкретном объекте в Тюмени (построенный административно-торговый комплекс) позволило повысить суммарное тепловое сопротивление ограждающей конструкции на 31%. Конструктивно на этом объекте после слоя жидкой теплоизоляции на внутренней поверхности стены была оставлена воздушная прослойка толщиной 20 мм, а затем был установлен гипсокартонный лист, на который наносилось ТТП.

При рассмотрении внутренней поверхности ограждающей конструкции в условиях без покрытия и с теплоотражающим покрытием, следует заметить, что составляющая будет неизменной, меняется лишь вследствие того, что меняется а конкретней

Как указывалось выше, для большинства строительных материалов коэффициент излучения составляет 0,91÷0,93.

На основании данных по коэффициентам излучения для ТПП ( = =0,52; = 0,34) из (17) можно получить коэффициент излучения воздуха (водяного пара), который численно равен 0,496.

Также на основании (17) для стены, не имеющей ТПП ( = 0,92) вычисляется приведенный коэффициент излучения: = 0,476.

Отсюда можно получить снижение лучистой составляющей удельного теплового потока вследствие применения теплоотражающего покрытия с микросферами. Параметры, относящиеся к стене без покрытия, будут иметь надстрочный индекс «\*». Тогда:

1,4.

Относительная эффективность снижения теплового потока составит:

×100% = ×100% = ×100% =31%.

По данным экспериментальных исследований /7/ коэффициент теплоотдачи от нагретого воздух к поверхности стенки составлял 3,9 Вт/(м2×°С), температура воздуха + 14,5 °С, температура стенки + 11,4°С.

В этом случае:

= 2.

Лучистые составляющие удельного теплового потока будут отличаться из-за различия в коэффициентах излучения поверхности:

= 0,476 = 7,95 Вт/м2.

= 0,34 =5,59 Вт/м2.

Значения результирующих тепловых потоков:

Вт/м2.

*=* Вт/м2.

Относительная эффективность теплоотражающего покрытия составляет:

×100% = ×100% = 12,2%

Полученный результат хорошо согласуется с данными экспериментальных исследований /7/ и доказывает эффективность использования теплоотражающего покрытия на внутренней поверхности ограждающих конструкций. Добавление алюминиевого пигмента повышало эффективность покрытия на дополнительные 5%.

***3. Использование покрытий для объектов военной инфраструктуры***

Практически все военные объекты испускают излучение в инфракрасном (тепловом) диапазоне спектра, так как их температура отличается от температуры окружающей среды (фона).

Инфракрасное излучение (особенно в коротковолновой и средневолновой его части) является дальнобойным и может обнаруживаться за десятки километров. Но его энергия зависит от многих факторов и случайных величин. Главенствующую роль среди факторов играют температура поверхности объекта и коэффициент его излучения, зависящий от свойств поверхностного слоя материала объекта. Но кроме этого на полученную термограмму влияют температура фона (окружающей среды, неба, солнца, местных предметов) и его коэффициента излучения, а также отраженное объектом излучение от фона.

В связи с этим средства разведки (наземной, воздушной) способны выявить замаскированные военные объекты и сооружения в любое время суток и при любых атмосферных условиях. Это стало тем более возможным при активном использовании беспилотных летательных аппаратов.

В связи с тем, что в одном спектральном диапазоне получить явно читаемую сигнатуру (т.е. тепловое изображение) объекта крайне сложно (даже в том случае, если фоновое влияние будет равно нулю) используют двухспектральные измерения, т.е. измерения в двух областях инфракрасного спектра. Как правило, они осуществляются в диапазоне длин волн: 3-5 мкм и 8 -13мкм. Двухспектральный анализ одного и того же поля обеспечи­вает повышенную точность тепловых измерений в широком диапазоне темпера­тур /8/.

Так, диапазон 8—13 мкм лучше подходит для различения довольно низких темпера­тур, тогда как диапазон 3—5 мкм дает лучшие результаты при высоких темпера­турах. С другой стороны, диапазон 3—5 мкм позволяет измерить больший градиент энергий и, следовательно, более высокие контрасты.

Использование инфракрасных рефлексивных покрытий с использованием микросфер позволяет сделать контуры предметов на термограмме расплывчатыми для средств разведки. Фактически предмет будет сливаться с окружающей средой. Это резко снижает эффективность систем обнаружения объектов и может обеспечить скрытность военных объектов.

Отражение инфракрасного излучения достигается применением покрытия, эффективность которого зависит, прежде всего, от рефлексивного профиля и крупности частиц компонентов в виде микросфер, включенных в покрытие.

Большие работы по этой тематике проведены голландской фирмой AkzoNobel, в которой работает около 60 000 специалистов в отделениях фирмы в 80 странах. Домбровским Л.А. /9/ было доказано, что микросферы диаметром 30-80 мкм, добавленные в полимерное связующее, эффективно отражают тепловое излучение и позволяют сделать его сигнатуру сливающуюся с фоном.

Это подтверждается и в работах других российских ученых /6/. Согласно проведенным исследованиям закрытые уплотненные соединения газонаполненных микросфер диаметром от 10 до 50 мкм являются эффективным отражателем в ближней инфракрасной области спектра.

Инфракрасные рефлексивные покрытия с теплоотражающими элементами способны обеспечить скрытность военных объектов, а, следовательно, повысить их защищенность и боеспособность.

В целях обеспечения тепловой маскировки может быть применено теплоотражающее покрытие, особенностью которого является поглощение и отражение излучения в инфракрасной части спектра внутрь защиты.

Согласно проведенным исследованиям /9/ закрытые уплотненные соединения газонаполненных микросфер диаметром от 10 до 50 мкм являются эффективным отражателем именно в ближней инфракрасной области спектра.

Такое покрытие обладает высокими адгезионными свойствами (1 балл), низкой теплопроводностью (около 0,06 Вт/(м× ̊С)), устойчивостью к прониканию влаги. При добавлении пигментов краска, представляющая собой водную дисперсию на основе стирол-акрилатных сополимеров и наполнителей, может иметь любой колер, в том числе и камуфляжный.

Кроме того, в настоящее время Россия вынуждена разворачивать группировку войск в арктических районах. Это связано, в первую очередь с защитой своих национальных интересов, как то: территориальных ареалов, добычи полезных ископаемых на арктическом шельфе, вылова морепродуктов.

В контексте этих событий возникают серьезные проблемы по обеспечению тепловой защиты объектов военной инфраструктуры, поскольку климатические условия этого региона существенно отличаются от варианта средней полосы.

Если рассматривать нормируемые теплофизические характеристики ограждающих конструкций зданий, то величина термического сопротивления наружных стен зданий должна быть: для Москвы и Санкт-Петербурга 3,03 и 2,99 , для Кандалакши - 3,7 , для Воркуты – 4,5, для Тикси (Якутия) – 4,9 . Следует учитывать, что норматив по теплозащите покрытий примерно в 1,5 раза выше, чем приведенный выше по стенам. Эти нормативные требования обязывают предусматривать применение новых материалов и технологий при проектировании и реконструкции объектов военной инфраструктуры.

Следует отметить, что применение минераловатных материалов не решает существующую проблему, так как при циклических процессах «промерзание – оттаивание» в них накапливается влага, которая сводит на нет их теплозащитные свойства.

Для улучшения качества конструкции необходимо применять материалы с близкими по теплотехническим характеристикам свойствами. В качестве образца можно предложить конструкцию, состоящую из кирпича (или газобетонных блоков) имеющую в основе кладочный (клеевой) раствор, штукатурный раствор, содержащие микросферы, и двустороннее покрытие поверхностей стены теплоотражающей краской с микросферами.

Повышение теплозащитных свойств здания можно определить на основании данных о теплопроводности традиционных и предлагаемых материалов (табл. 3).

***Таблица 3***

**Сравнение теплозащитных характеристик материалов**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **№пп** | **Наименование элемента конструкции** | **Тепло-проводность стандартного варианта** | **Тепло-проводность с микросферами** | **Эффект применения, кратность** |
| 1. | Кирпичная стена с кладочным раствором | 0,93 | 0,16-0,32 | 5,8-2,9 |
| 2. | Пенобетонные блоки на клеевом растворе | 0,78 | 1,51 | 4,9-2,5 |
| 3. | Штукатурный раствор | 0,81 | 0,16-0,32 | 5,1-2,55 |
| 4. | Краска по штукатурному раствору | 0,18-0,4 | 0,06 | 3-6,7 |

Исходя из представленных данных, можно утверждать, что теплоотражающая краска (по 1,5 мм с каждой стороны конструкции) и штукатурный раствор по 10 мм с каждой стороны конструкции) дают дополнительное теплосопротивление в размере 0,128 м2×оС/Вт. Это позволяет уменьшить толщину стены из пенобетона с учетом клеевого раствора на 10 см, толщину стены из кирпича на 18,5 см, а из керамического камня – на 15 см.

**Выводы.**

1. Теплоотражающие (рефлексивные) покрытия обладают способностью тепловой маскировки объектов военной инфраструктуры от средств разведки.
2. Современные тонкопленочные покрытия, содержащие микросферы, позволяют повысить эффективность тепловой защиты объектов военной инфраструктуры.
3. Повышение эффективности теплозащиты при применении тонкопленочных покрытий на наружной поверхности ограждающих конструкций (стен, покрытий) может достигать 20-35% в зависимости от вида покрытия и концентрации микросфер в объеме компаунда.
4. Использование теплоотражающего покрытия на внутренней поверхности ограждающих конструкций также является эффективным и повышает теплозащитные свойства конструкции на 12%. Добавление алюминиевого пигмента в акриловую основу с микросферами увеличивает эффективность теплозащиты на 5%
5. При применении тонкопленочных теплозащитных покрытий в строительстве необходимо проверять заявляемые характеристики в сертифицированных научно-исследовательских центрах и лабораториях.

Литература:

1. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи: Пер. с англ. –М: Мир, 1983. -512с.
2. Расчет интегрального отражения и пропускания инфракрасного излучения для покрытия, состоящего из плотно упакованных стеклянных микросфер (ПСМ) в полимерной матрице. Отчет Института Физики НАНБ. Минск, 2003.

Строй А.Ф. Управление тепловыми режимами зданий и сооружений. Киев: Вища школа. 1993. – 153 с.

1. Методика расчета сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции здания с учетом покрытия «микросфера -связующее». Сайт Группы компаний «Инотек».// [www.inoteck.net/metodika\_rascheta\_soprot. 5](http://www.inoteck.net/metodika_rascheta_soprot.%205) с.

Отчет о выполнении НИР по х/д №201от 01.03.2000г.:»Разработать математическую модель теплопереноса в покрытиях, представляющих собой компаунд из связующего и полых стеклянных микросфер».// АНК «Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова» НАНБ, 2000, 28 с.

1. Герман М.Л., Гринчук П.С Математическая модель для расчета теплозащитных свойств композиционного покрытия «керамические микросферы - связующее». Инженерно-физический журнал, том 75 № 6, ноябрь –декабрь 2002 г. С. 50.
2. Панченко Ю.Ф., Зимакова Г.А., Панченко Д.А. Энергоэффективность использования нового теплозащитного материала для снижения теплопотребления зданий и сооружений. Вестник Тюменского государственного архитектурно-строительного университета, №4, 2011. с. 97-105.
3. Ж. Госсорг. Инфракрасная термография. Основы, техника, применение. М. «Мир», 1988, с. 378.
4. Л.А. Домбровский. Ж. «Физика высоких температур». Том 42, №5, сс. 776-784.