

УДК 623.77

Карасёв Сергей Юрьевич, кандидат технических наук,
Военно-космическая академия им. А.Ф.Можайского,
г. Санкт-Петербург

Лебедь Богдан Петрович, кандидат технических наук,
Военно-космическая академия им. А.Ф.Можайского,
г. Санкт-Петербург

Толмачёв Сергей Анатольевич, кандидат военных наук, доцент,
Военно-космическая академия им. А.Ф.Можайского,
г. Санкт-Петербург

МЕТОДИКА РАСЧЁТА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ БЫСТРОВЗВОДИМЫХ КАРКАСНЫХ СООРУЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОКРАСОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация: В статье представлена методика, которая позволяет выбрать вариант теплоизоляции ограждающих конструкций быстровозводимых каркасных сооружений, основанный на использовании инновационных окрасочных материалов по созданию интеграционного эффекта теплоизоляции и теплоотражения наружного покрытия быстровозводимых сооружений от теплового потока, работающих внутри агрегатов и систем отопления.

Ключевые слова: быстровозводимые каркасные сооружения, ограждающие конструкции и покрытия, снижение тепловых потерь, инновационные окрасочные материалы, состав и компоненты смесей, диффузионный и конвективный тепловой процесс.

Теплоизоляция ограждающих конструкций легких быстровозводимых каркасных сооружений достигается проведением комплекса мероприятий, целью которых является максимально сохранить тепловой режим внутреннего объема, необходимого для выполнения какого-либо технологического процесса и комфортного пребывания персонала в любых погодных условиях конкретного региона. При сохранении традиционных способов теплоизоляции ограждающих конструкций быстровозводимых сооружений на первый план выходят мероприятия с широким использованием новейших средств и материалов по созданию интеграционного эффекта теплоизоляции и теплоотражения ограждающих конструкций быстровозводимых сооружений, что позволяет в короткие сроки, применяя окрасочный слой тонкослойного теплоизоляционного покрытия (ТПП) наружной стороны ограждающей конструкции, сохранить требуемый тепловой режим внутреннего объема сооружения.

В этом заключается основная идея сохранения внутреннего теплового режима быстровозводимых сооружений, которая разработана на основе всестороннего анализа сущности физического процесса распространения тепла внутри сооружения, учитывающего как диффузионную так и конвективную составляющие термодинамического процесса.

Быстровозводимые каркасные сооружения (рисунок 1) предназначены для хранения различного имущества, технического обслуживания и ремонта различной техники и агрегатов.



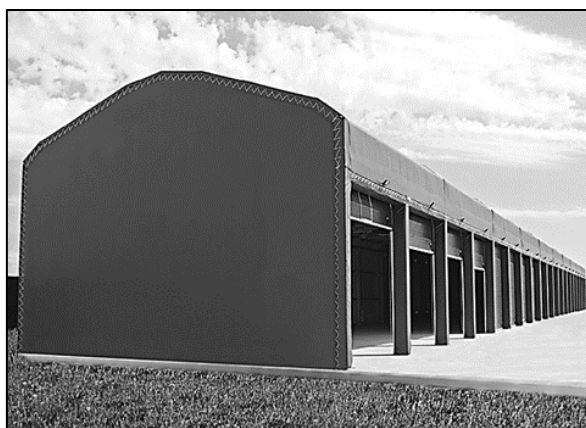


Рис. 1. Быстровозводимое сооружение

Такие сооружения позволяют защитить от атмосферных воздействий материальные средства, обеспечить комфортные условия работы обслуживающего персонала в любых погодных и климатических условиях при заданном температурном режиме внутри сооружения [1, 2, 3].

Преимуществами использования каркасных быстровозводимых сооружений являются:

- оснащение регионов страны с холодным климатом быстровозводимыми сооружениями в кратчайшие сроки и с минимальными затратами;
- создание оптимальных (необходимых) условий для хранения имущества и комфортных условий работы обслуживающего персонала;
- сохранение технической и эксплуатационной готовности техники и агрегатов, укрываемых в сооружении от климатических воздействий.

В результате всесторонней оценки всего множества преимуществ, свойственных быстровозводимым каркасным сооружениям, установлено, что наибольший интерес для заказчика и приобретателя таких сооружений представляют его свойства сохранять требуемый тепловой режим внутреннего объема в любых погодных условиях конкретного региона.

Актуальность разработанной методики заключается в необходимости выявления потерь тепла при протекании теплообменных процессов внутри быстровозводимых каркасных сооружений и определении состава окрасочных смесей для эффективного противодействия этим потерям.

Математическая модель, оценивания качественных и количественных характеристик теплового состояния быстровозводимых каркасных сооружений в зависимости от режима работы в них техники, агрегатов и систем отопления, комплексно описывает характер возникновения и развития негативных факторов при протекании термодинамических процессов в замкнутом объеме сооружения и позволяет количественно оценивать степень потерь тепла.

Структурно данная математическая модель основывается на классическом уравнении теплопроводности, выражающем закон Фурье [4]:

$$U_t = a^2 (U_{xx} + U_{yy} + U_{zz}) + f(x, y, z, t), \quad (1)$$

где: U_t – искомая функция распространения тепла внутри быстровозводимого сооружения; a – коэффициент теплопроводности; $f(x, y, z, t)$ – плотность источников тепла; U_{xx} , U_{yy} , U_{zz} – функции формирования объемного теплового поля в координатном пространстве.

Используя закон Фурье в интегральной форме для оценки количества тепла, проходящего через ограждающее покрытие сооружения за время работы техники, агрегатов и системы отопления в конкретном режиме, на основании закона теплоемкости установлено, что



конечная температура на поверхности сооружения T_{TC} линейно зависит от суммарных тепловыделений работающих систем и агрегатов $Q_{СпC(i)}^A$ и квадратично – от времени их работы Δt .

Конечное уравнение рассматриваемой математической модели в параметрической форме имеет вид [4]:

$$T_{TC(i)} = \left(T_{ВВ}^0 + \frac{Q_{СпC(i)}^A t_{(i)}}{\rho_B C_B V_c} \right) K_{\phi} \cdot \left(1 + \frac{\lambda_{п} S_{\phi} t_{(i)}}{C_{п} m_{п} \Delta z} \right) - \frac{\lambda_{п} T_{НВ(\phi)} S_{\phi}}{C_{п} m_{п} \Delta z} t_{(i)}, \quad (2)$$

где: $T_{ВВ}^0$ – температура внутреннего воздуха в момент запуска агрегатов и системы отопления; $Q_{СпC(i)}^A$ – суммарные выделения от работы силовых агрегатов в i -ом режиме работы техники в сооружении; $t_{(i)}$ – время работы техники в i -ом режиме; ρ_B – плотность воздуха; C_B – теплоемкость воздуха; V_c – внутренний объем в сооружении; K_{ϕ} – коэффициент, характеризующий конвективную составляющую распространения тепла (согласно второго закона Фика); λ_n – теплопроводность материала покрытия (смеси); C_n – теплоемкость материала покрытия (смеси); m_n – масса материала покрытия (смеси); Δz – проекционная высота конвективной составляющей (высота внутреннего объема сооружения); S_{ϕ} – площадь взаимодействия конвективного столба с ограждающей конструкцией сооружения (приближенная площадь обобщенной теплоизлучающей поверхности).

Достоверность теоретических положений предлагаемой математической модели проверялась путем проведения экспериментальных исследований. Проведенный модельный лабораторный эксперимент натурно подтвердил ряд выдвинутых гипотез исследования, позволил выявить характерные зависимости, имеющие прикладное значение в исследуемой предметно-научной области и оценить достоверность теоретических расчетов. Цель эксперимента была – проверить работоспособность предлагаемых окрасочных покрытий (смесей), призванных предотвратить тепловые потери быстровозводимого каркасного сооружения при прогреве внутреннего объема системой отопления и тепловыми выделениями работающей техники и агрегатов.

Состав окрасочных покрытий подбирался на основе знаний в данной предметной области (таблица 1) по классическим схемам построения структуры композитного материала (связующее вещество / рабочее вещество / добавки) для конкретных целей. Соотношение компонентов состава определялось на основе теоретических расчетов по предложенной зависимости (2) путем ее преобразования для вычисления требуемой теплопроводности окрасочного покрытия λ_n в условиях заданных параметров тепловой сигнатуры быстровозводимого каркасного сооружения.

Таблица 1

Составы окрасочных покрытий

| № образца покрытия | Связующее вещество | Рабочее вещество | Добавки | Объемное содержание компонентов (%) |
|--------------------|---|--------------------|-------------|-------------------------------------|
| 1 | Жидкий латекс | Алюмосиликатные | – | 15/85/– |
| 2 | Латекс | Керамические | Золь железа | 20/73/7 |
| 3 | Окрасочный состав промышленного изготовления – краска «Magniterm» | | | |
| 4 | Жидкий латекс | Базальтовая крошка | – | 15/85/– |
| 5 | Латекс | Асбестовое волокно | – | 40/60/– |



| 6 | Фольгированный поливинилхлорид на клеевой основе | | | |
|-----|--|--------------------|--------------|----------|
| 7 | Латекс | Полимерные | Алюминиевая | 25/55/20 |
| 8 | Латекс | Полимерные | Золь серебра | 35/58/7 |
| 9 | Латекс | Керамические | Алюминиевая | 20/60/20 |
| 10 | Латекс | Краска «Magniterm» | Алюминиевая | 10/70/20 |
| 11* | Латекс | Керамические | Алюминиевая | 20/60/20 |
| 12* | Латекс | Керамические | – | 30/70/– |

В качестве рабочего вещества использовались полимерные и минеральные вещества, обладающие на сегодняшний день самым низким коэффициентом теплопроводности. В качестве добавок использовались растворы на основе мелкодисперсных и коллоидных частиц (нано частиц) металлов (*Fe*, *Al*, *Ag*), обладающих высокой теплоотражающей способностью. Образцы покрытия № 11* и № 12* отличаются способом устройства окрасочного покрытия в виде послойного нанесения компонентов на наружную поверхность ограждающей конструкции макета быстровозводимого каркасного сооружения.

В ходе проведения эксперимента выявлены недостатки и преимущества испытанных покрытий (смесей), дальнейшее исследование которых позволит создать методологическую основу для разработки комбинированных покрытий, в которых ключевые недостатки могут быть нивелированы. По результатам эксперимента установлены границы и критерии применимости каждого из них, а также оценен эффект от применения испытанных покрытий. Важное обстоятельство, которое подтвердил проведенный эксперимент, заключается в том, что для достижения целей исследований при противодействии возникновению и развитию тепловых потерь, необходимо использовать эффект отражения тепла.

Использование научно обоснованных вариантов подбора состава окрасочного покрытия позволили добиться требуемого эффекта (отсутствия потерь тепла). В завершении экспериментальных испытаний проведен ряд операций с соответствующими замерами для выбора оптимального варианта структуризации проектируемого окрасочного композитного состава. Основными прототипами способов структуризации стали:

- послойное нанесение компонентов окрасочного состава с целью последовательной активизации целевых свойств материалов при протекании термодинамических процессов;
- перемешивание компонентов до требуемой однородности с последующим нанесением для проверки гипотезы об усилении отдельных свойств одного материала «родственными» свойствами другого материала.

В результате проведенного эксперимента удалось установить факт, указывающий на снижение эффективной теплопроводности композитного (инновационного) материала за счет введения в его состав теплоотражающего агента. Оценить теплоотражающие свойства материала на теоретическом уровне является сложной математической задачей ввиду присутствия в уравнениях функций нескольких стохастических переменных. Ввиду данных обстоятельств по результатам испытаний всего цикла операций эксперимента была построена эмпирическая модель подбора теплоизолирующего состава окрасочного покрытия с применением метода структурно-параметрической реконфигурации.

Графическое представление эффекта, положенного в основу модели представлено на рисунке 2 по аналогии с формализованным механизмом распространения тепла в каркасном композитном материале.



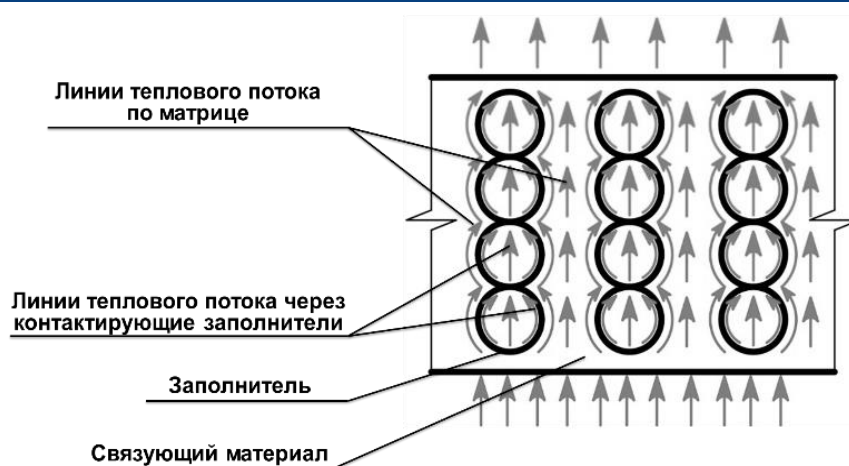


Рис. 2. Матричная модель распространения тепла в окрасочном композитном материале

В рассматриваемом механизме линии теплового потока в матрице вещества имеют упорядоченную структуру, и ввиду сравнительно высокой теплопроводности связующего материала, процесс теплопередачи происходит с интенсивностью, достаточной для проявления тепловых потерь на внешней поверхности оболочки модели сооружения. Введение теплоотражающего агента в связующее вещество приводит к изменению направленного расположения линий теплового потока на хаотичное, вследствие чего эффективная теплопроводность снижается до уровня, удовлетворяющего установленным требованиям. Данное явление основано на физическом эффекте, заключающемся в обволакивании микросфер мелкодисперсными (коллоидными) частицами металлического теплоотражающего агента.

В предлагаемой модели учитывается синтез теплоотражающего окрасочного покрытия, основанный на использовании различных механизмов блокирования (изоляции) тепловыделений в сооружении за счет введения в его состав различных компонентов: полимерных микросфер, которые обеспечивают теплоизолирующие свойства за счет низкого коэффициента теплопроводности; золь железа, алюминиевой пудры или золь серебра, которые обеспечивают теплоотражающие свойства за счет высокого коэффициента отражения. Это позволяет выявлять зависимость комплексного коэффициента теплопроводности окрасочного покрытия от объемного содержания в нем теплоотражающего агента.

Кроме этого, в математической модели учитывается влияние диффузионной и конвективной составляющих теплообменного процесса, протекающего в быстровозводимом сооружении, на уровень (объем) тепловых потерь его внешней оболочки ограждающей конструкции, что позволяет, с учетом установленной закономерности распределения тепловой энергии излучаемой оборудованием во внутреннем объеме сооружения, рассчитать реальный тепловой контраст $\Delta T_{тс}$ между температурой на поверхности сооружения $T_{тс}$ и температурой наружного (окружающего) воздуха $T_{нв}$.

Предлагаемая методика выбора состава инновационного окрасочного покрытия для устранения (ослабления) тепловых потерь быстровозводимого сооружения, обеспечивает проведение научно-обоснованных мероприятий по подбору смеси в соответствии с конкретными требованиями к тепловому режиму внутреннего объема сооружения.

Данная методика основывается на экспериментально апробированной математической модели формирования тепловой сигнатуры быстровозводимого сооружения и реализуется по алгоритму, приведенному в блок-схеме на рисунке 3. Она включает в себя три основных структурных блока элементов: блок анализа (исходных данных); блок вычислений; блок перебора (вариативный) [4].



Данный алгоритм расчетов позволяет поэтапно определять фактический объем тепловых потерь быстровозводимого сооружения в инфракрасном диапазоне спектра длин ЭМВ с учетом обеспечения необходимого уровня комфортности, а в случае несоответствия – вычислить его количественное выражение, позволяющее оптимально разработать и провести соответствующий комплекс мероприятий по снижению выявленных потерь.

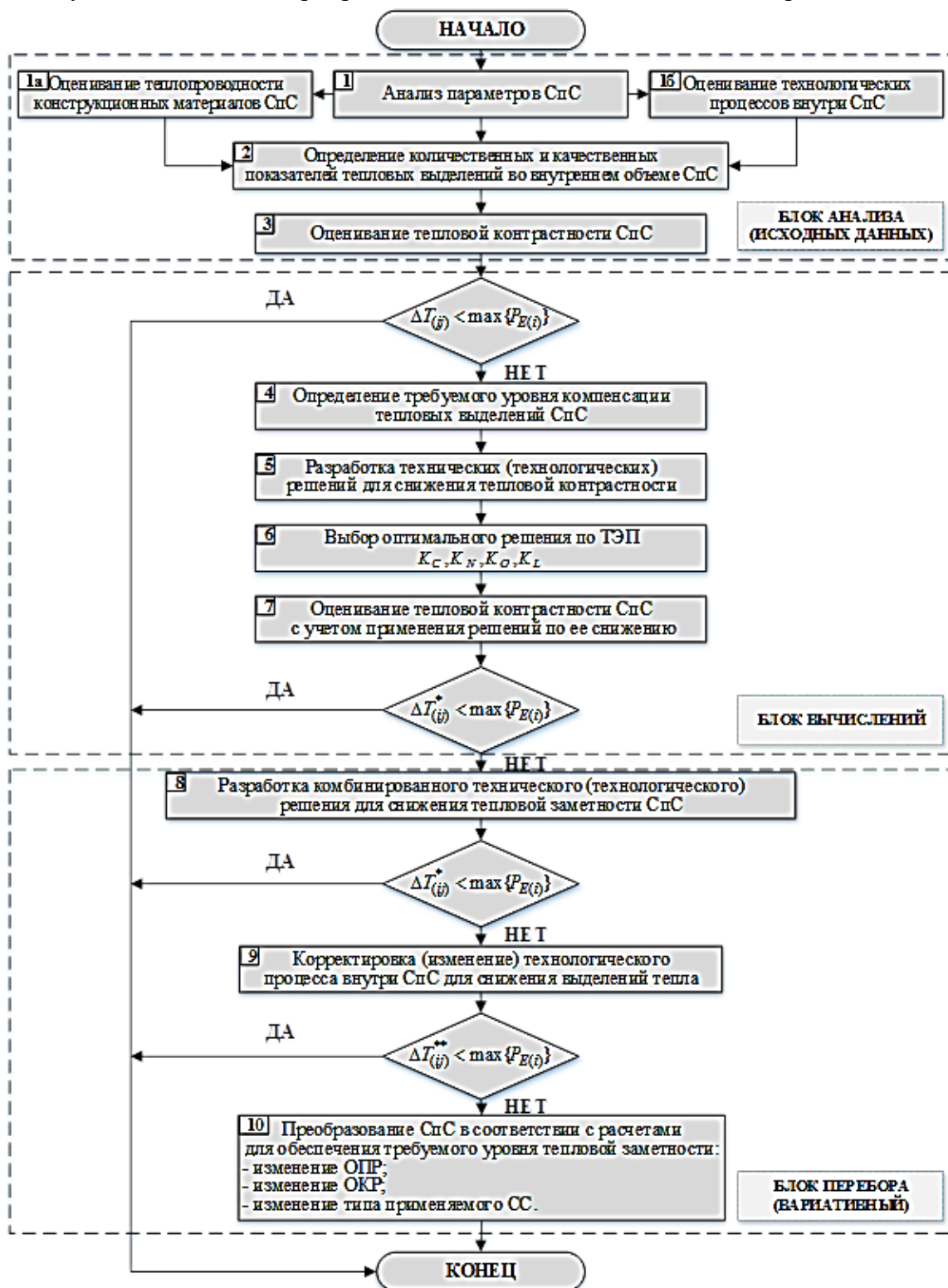


Рис. 3. Блок-схема методики выбора состава инновационного покрытия для устранения (ослабления) тепловых потерь быстровозводимого сооружения



Таким образом, возникновение доминирующей составляющей процесса теплообмена внутри быстровозводимого сооружения в виде восходящего конвективного потока от источников тепловой энергии и как следствие, неравномерного распределения объемного теплового поля в пространстве, приводит к локализации тепловых масс в непосредственной близости от внешней оболочки сооружения, что приводит к локальному ее прогреву и возникновению тепловых потерь.

Новые окрасочные составы ТТП, созданные на основе экспериментально выявленных зависимостей «тепlobлокирующих» свойств композитного материала от объемного содержания в нем теплоизолирующего (полимерных микросфер) и теплоотражающего агентов (золь железа, алюминиевой пудры и золь серебра), позволяют снизить тепловые потери и контраст между температурой на поверхности сооружения и температурой окружающего воздуха.

Список литературы:

1. Тенто-мобильные укрытия. СТАТУС АРМС: военно-теоретический журнал. [Эл. ресурс] – URL: <http://status-arms.ru/katalog/importozameschenie/tmu/tento-mobilnye-ukrytiya/> Дата обращения 16.02.2023.
2. Мушинский А.Н. Строительство быстровозводимых зданий и сооружений / А.Н. Мушинский, С.С. Зимин // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2015, №4 (31). – С.182-193.
3. Каркасные здания, тенто-мобильные конструкции ВВСТ. Международный концерн DoorHan [Эл. ресурс] – URL: <https://doorhan.ru/spravka/data-test.php?data=AMS-6-24x50.xml>. Дата обращения 16.02.2023.
4. Сычева А.М. Метод получения маскировочных теплоизоляционных покрытий для сооружений специального назначения / А.М. Сычева, С.А. Мачнев, А.М. Шевчук, Тюрин Е.А. // Вопросы оборонной техники. Серия 16: технические средства противодействия терроризму. – 2018. – №11-12 (125-126). – С.87-94.

