

УДК 623.77

doi: 10.53816/23061456_2025_9–10_136

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ТЕНТОВОГО СООРУЖЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ОКРАСОЧНОГО ПОКРЫТИЯ

ENSURING THE TEMPERATURE CONDITION OF A TENT STRUCTURE USING A HEAT-INSULATING PAINTING COATING

Канд. воен. наук С.А. Толмачев, канд. техн. наук Б.П. Лебедь, канд. техн. наук А.М. Шевчук

Ph.D. S.A. Tolmachev, Ph.D. B.P. Lebed, Ph.D. A.M. Shevchuk

Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского

В статье представлен методический подход, позволяющий выбрать вариант теплоизоляции ограждающих конструкций тентового сооружения, основанный на использовании инновационных окрасочных покрытий по созданию интеграционного эффекта теплоизоляции и теплоотражения наружного покрытия тентового сооружения от теплового потока, работающих внутри агрегатов и систем отопления. Теплоизоляция ограждающих конструкций тентового сооружения достигается проведением комплекса мероприятий, целью которых является максимально сохранить температурный режим внутреннего объема, необходимого для выполнения различных технологических процессов и комфортного пребывания, работающего в нем персонала. При сохранении традиционных способов теплоизоляции ограждающих конструкций на первый план выходят мероприятия с широким использованием новых тонкослойных теплоизоляционных покрытий (ТТИ) по созданию интеграционного эффекта теплоизоляции и теплоотражения.

Ключевые слова: тентовое сооружение, ограждающие конструкции, тонкослойные теплоизоляционные покрытия, температурный режим, снижение тепловых потерь, инновационные окрасочные материалы, состав и компоненты смесей, диффузионный и конвективный тепловой процесс.

The article presents a methodical approach that allows choosing a thermal insulation option for enclosing structures of a tent structure, based on the use of innovative paint coatings to create an integrated effect of thermal insulation and heat reflection of the outer coating of the tent structure from the heat flow operating inside the units and heating systems. Thermal insulation of the enclosing structures of a tent structure is achieved by carrying out a set of measures, the purpose of which is to maximally preserve the temperature regime of the internal volume necessary for the implementation of various technological processes and a comfortable stay of the personnel working in it. While maintaining traditional methods of thermal insulation of enclosing structures, measures with the widespread use of new thin-layer thermal insulation coatings (TTI) to create an integrated effect of thermal insulation and heat reflection come to the fore.

Keywords: tent structure, enclosing structures, thin-layer thermal insulation coatings, temperature conditions, reduction of heat loss, innovative paint materials, composition and components of mixtures, diffusion and convective thermal process.

Тентовые сооружения предназначены для индивидуального или группового хранения и приведения в готовность к использованию различной техники и агрегатов. Такие сооружения позволяют защитить технику и имущество от атмосферных воздействий, обеспечить техническое обслуживание и ремонт агрегатов в сложных погодных и климатических условиях при заданном температурном режиме внутри сооружения [1–3].

Преимуществами использования тентовых сооружений являются [6, 8]:

- оснащение регионов страны с холодным климатом быстровозводимыми сооружениями в кратчайшие сроки и с минимальными затратами;
- создание оптимальных (необходимых) условий для хранения техники, имущества, а также условий для работы обслуживающего персонала;
- сохранение технической и эксплуатационной готовности техники и агрегатов внутри сооружения от негативного климатического воздействия.

В результате всесторонней оценки технических характеристик тентовых сооружений, выявлено, что такие сооружения в большинстве случаев не предназначены для разборки и переноса их в другое место для дальнейшей эксплуатации, и поэтому являются больше стационарными, чем сборно-разборными, что позволяет увеличить сроки их эксплуатации. В тоже время, к современным образцам техники предъявляют повышенные требования к температурному режиму мест их хранения и обслуживания, что гарантирует длительный срок эксплуатации техники по назначению.

Актуальность разработки способов обеспечения температурного режима тентового сооружения состоит в необходимости выявления негативных факторов формирования тепловых потерь на поверхности сооружения, при протекании теплообменных процессов внутри сооружения, с целью определения состава окрасочного тонкослойного теплоизоляционного покрытия для устранения тепловых потерь.

Математическая модель оценивания качественных и количественных характеристик теплового состояния тентового сооружения

Математическая модель, оценивания качественных и количественных характеристик теп-

лового состояния тентовых 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]:

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

где U_t — искомая функция распространения тепла внутри тентового 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 тентовое сооружение за время работы техники в конкретном режиме работы, на основании закона теплоемкости установлено, что конечная температура на поверхности сооружения ТТС линейно зависит от суммарных тепловыделений работающих агрегатов $Q_{\text{снС}(i)}^A$ и квадратично — от времени их работы Δt .

Конечное уравнение рассматриваемой математической модели в параметрической форме имеет вид [5]:

$$T_{\text{ТС}(i)} = \left(T_{\text{вв}}^0 + \frac{Q_{\text{снС}(i)}^A}{\rho_{\text{в}} C_{\text{в}} V_{\text{с}}} \right) K_{\phi} \cdot \left(1 + \frac{\lambda_{\text{п}} S_{\phi} t_{(i)}}{C_{\text{п}} m_{\text{п}} \Delta z} \right) - \frac{\lambda_{\text{п}} T_{\text{нв}(\phi)} S_{\phi}}{C_{\text{п}} m_{\text{п}} \Delta z} t_{(i)}, \quad (1)$$

где $T_{\text{вв}}^0$ — температура внутреннего воздуха в момент запуска агрегатов;

$Q_{\text{снС}(i)}^A$ — суммарные выделения от работы силовых агрегатов в i -м режиме работы техники;

$t_{(i)}$ — время работы техники в i -м режиме;

$\rho_{\text{в}}$ — плотность воздуха;

$C_{\text{в}}$ — теплоемкость воздуха;

$V_{\text{с}}$ — внутренний объем в сооружении;

K_{ϕ} — коэффициент, характеризующий конвекционную составляющую распространения тепла (согласно второго закона Фика);

λ_{π} — теплопроводность материала покрытия;

C_{π} — теплоемкость материала покрытия;

m_{π} — масса материала покрытия;

Δz — проекционная высота конвекционной составляющей (высота внутреннего объема сооружения);

S_{ϕ} — площадь взаимодействия конвективного столба с покрытием сооружения (приближенная площадь обобщенной теплоизлучающей поверхности).

Кроме этого, в математической модели учитывается влияние диффузионной и конвективной составляющих теплообменного процесса, протекающего в тентовом 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 $\Delta(TTC)$ между температурой на поверхности сооружения (TTC) и температурой наружного (окружающего) воздуха (ТНВ).

Достоверность теоретических положений предлагаемой математической модели прове-

рялась 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 — проверить работоспособность предлагаемых окрасочных покрытий (смесей), призванных предотвратить тепловые потери тентового сооружения при прогреве внутреннего объема тепловыми выделениями работающей техники, агрегатов и системой отопления [7, 9].

Состав окрасочных покрытий подбирался на основе знаний в данной предметной области (таблица) 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 (1) путем ее преобразования для вычисления требуемой теплопроводности окрасочного покрытия λ_{π} в условиях

Таблица

№ образца покрытия	Связующее вещество	Рабочее вещество	Добавки	Объемное содержание компонентов (%)
1	Жидкий латекс ГСЖ-11	Алюмосиликатные микросферы	—	15/85/—
2	Латекс влагостойкий	Керамические микросферы	Золь железа	20/73/7
3	Окрасочный состав промышленного изготовления — краска «Magniterm»			
4	Жидкий латекс ГСЖ-11	Базальтовая крошка	—	15/85/—
5	Латекс влагостойкий	Асбестовое волокно	—	40/60/—
6	Фольгированный поливинилхлорид на клеевой основе			
7	Латекс влагостойкий	Полимерные микросферы	Алюминиевая пудра ПАП-2	25/55/20
8	Латекс влагостойкий	Полимерные микросферы	Золь серебра	35/58/7
9	Латекс влагостойкий	Керамические микросферы	Алюминиевая пудра ПАП-2	20/60/20
10	Латекс влагостойкий	Краска «Magniterm»	Алюминиевая пудра ПАП-2	10/70/20
11*	Латекс влагостойкий	Керамические микросферы	Алюминиевая пудра ПАП-2	20/60/20
12*	Латекс влагостойкий	Керамические микросферы	—	30/70/—

заданных параметров тепловой сигнатуры тентового сооружения.

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

Выбор состава окрасочного покрытия для устранения тепловых потерь тентового 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 нанесени-

ем 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 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.

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; золя железа, алюминиевой пудры или золя 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.

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

Заключение

Таким образом, возникновение доминирующей составляющей процесса теплообмена внутри тентового 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, к локальному ее прогреву и возникновению тепловых потерь.

Окрасочные составы тонкослойных теплоизоляционных покрытий, созданные на основе экспериментально выявленных зависимостей «теплоблокирующих» свойств композитного материала от объемного содержания в нем теплоизолирующего (полимерных микросфер) и теплоотражающего агентов (золь железа, алюминиевая пудра и золь серебра), позволяют снизить тепловые потери и контраст между температурой на поверхности тентового сооружения и температурой окружающего воздуха.

Список источников

1. Тенто-мобильные укрытия. СТАТУС АРМС: военно-теоретический журнал. URL: <http://status-arms.ru/katalog/importozameschenie/tmu/tento-mobilnye-ukrytiya/> (дата обращения: 16.01.2025).
2. Мушинский А.Н., Зимин С.С. Строительство быстровозводимых зданий и сооружений // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 4 (31). С. 182–193.
3. Каркасные здания, тенто-мобильные конструкции ВВТ. Международный концерн DoorHan. URL: <https://doorhan.ru/spravka/data-test.php?data=AMS-6-24x50.xml>. (дата обращения: 24.12.2024).
4. Петрова И.В., Тюлина А.К. Решение уравнений математической физики методом Фурье. М.: РГУ нефти и газа, 2018. 93 с.
5. Сычева А.М., Мачнев С.А., Шевчук А.М. и др. Метод получения теплоизоляционных покрытий для сооружений специального назначения // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 11–12 (125–126). С. 87–94.
6. СП 384.1325800.2018. Конструкции строительные тентовые. Правила проектирования. М.: Стандартинформ, 2018. 22 с.
7. Захаров А.А., Низовцев М.И. Экспериментальные исследования регенератора тепла вентиляционного воздуха с изменяющимся направлением воздушного потока // Научный вестник

Новосибирского государственного технического университета. 2014. № 1 (54). С. 143–150.

8. Зубарева Г.И., Мосунов Е.Э. Арочные каркасно-тентовые облегченные конструкции для быстровозводимых спортивных сооружений // Наука среди нас. 2019. № 8 (24). С. 50–54.

9. Петросова Д.В. Филтрация воздуха через ограждающие конструкции // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 2 (28). С. 24–31.

Resources

1. Tent-mobile shelters. STATUS ARMS: military-theoretical journal. URL: <http://status-arms.ru/katalog/importozameschenie/tmu/tento-mobilnye-ukrytiya/> (date of access: 16.01.2025).
2. Mushinsky A.N., Zimin S.S. Construction of prefabricated buildings and structures // Construction of unique buildings and structures. 2015. No 4 (31). Pp. 182–193.
3. Frame buildings, tent-mobile structures of military equipment. International concern DoorHan. URL: <https://doorhan.ru/spravka/data-test.php?data=AMS-6-24x50.xml>. (date of access: 24.12.2024).
4. Petrova I.V., Tyulina A.K. Solution of equations of mathematical physics by the Fourier method. M.: RSU of Oil and Gas, 2018. 93 p.
5. Sycheva A.M., Machnev S.A., Shevchuk A.M. et al. Method for obtaining thermal insulation coatings for special-purpose structures // Issues of defense equipment. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2018. No 11–12 (125–126). Pp. 87–94.
6. SP 384.1325800.2018 Tent building structures. Design rules. M.: Standartinform, 2018. 22 p.
7. Zakharov A.A., Nizovtsev M.I. Experimental studies of a ventilation air heat regenerator with a variable air flow direction // Scientific Bulletin of the Novosibirsk State Technical University, 2014. No 1 (54). Pp. 143–150.
8. Zubareva G.I., Mosunov E.E. Arched frame-tent lightweight structures for quickly erected sports facilities // Science among us. 2019. No 8 (24). Pp. 50–54.
9. Petrosova D.V. Air filtration through enclosing structures // Civil Engineering Journal, 2012. No 2 (28). Pp. 24–31.