Научная статья
УДК 614.841.343:539.097; DOI: 10.61260/1998-8990-2026-3-144-159

ОЦЕНКА ОГНЕСТОЙКОСТИ И ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ ЗАЩИТНЫХ КОНТЕЙНЕРОВ В УСЛОВИЯХ ГОРЕНИЯ ЛИТИЙ-ИОННЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

✉Столяров Святослав Олегович;
Крутолапов Александр Сергеевич.
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия.
Минкин Денис Юрьевич.
Комитет по транспорту Санкт-Петербурга, Санкт-Петербург, Россия
✉79990252529@yandex.ru

Аннотация. Актуальность работы обусловлена ростом числа пожаров, вызванных тепловым разгоном литий-ионных аккумуляторов, и сложностью их тушения. Эффективным средством минимизации последствий является пассивная локализация тепловых процессов. Цель исследования – научное обоснование конструктивных и теплотехнических параметров защитного контейнера-саркофага для безопасного хранения аварийных литий-ионных аккумуляторов на промышленных объектах, обеспечивающего огнестойкость EI 120. В качестве расчётного температурного режима принят углеводородный пожар (ГОСТ Р ЕН 1363-2–2014). Решение теплофизической задачи выполнено посредством численного моделирования нестационарного теплового поля в программном комплексе Elcut с учётом нелинейных теплофизических характеристик материалов. Предложена многослойная схема ограждающей конструкции: керамика 30 мм, сталь 3 мм, базальтовая плита 50 мм, сталь 2 мм. Результаты моделирования показали, что температура на необогреваемой поверхности через 120 мин не превышает 220 °С, что соответствует критерию потери теплоизолирующей способности. Разработаны рекомендации по оснащению контейнера системами газоотвода, сброса избыточного давления и пожаротушения.

Ключевые слова: литий-ионные аккумуляторы, тепловой разгон, огнестойкость, защитный контейнер, численное моделирование, Elcut, многослойная конструкция, теплоизоляция

Для цитирования: Столяров С.О., Крутолапов А.С., Минкин Д.Ю. Оценка огнестойкости и пожарной опасности защитных контейнеров в условиях горения литий-ионных аккумуляторов // Проблемы управления рисками в техносфере. 2026. № 3 (79). С. 144–159. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-3-144-159

© Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, 2026

Scientific article

ASSESSMENT OF FIRE RESISTANCE AND FIRE HAZARD OF PROTECTIVE CONTAINERS UNDER CONDITIONS OF COMBUSTION OF LITHIUM-ION BATTERIES

✉**Stolyarov Svyatoslav O.;**
Krutolapov Alexander S.
Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia.
Minkin Denis Yu.
Saint-Petersburg transport committee, Saint-Petersburg, Russia
✉***79990252529@yandex.ru***

Abstract. The relevance of this study is due to the increasing number of fires caused by thermal runaway of lithium-ion batteries (LIB) and the difficulty of extinguishing them. Passive localization of thermal processes is an effective means of minimizing the consequences. The objective of the study is to scientifically substantiate the design and thermal parameters of a protective sarcophagus container for the safe storage of emergency of lithium-ion batteries at industrial facilities, providing EI 120 fire resistance. A hydrocarbon fire (GOST R EN 1363-2–2014) was adopted as the design temperature regime. The thermal physics problem was solved through numerical modeling of a transient thermal field in the Elcut software package, taking into account the nonlinear thermal properties of the materials. A multilayer enclosing structure is proposed: 30 mm ceramics, 3 mm steel, 50 mm basalt slab, and 2 mm steel. Modeling results showed that the temperature on the unheated surface does not exceed 220 °C after 120 minutes, which meets the criterion for loss of thermal insulation capacity. Recommendations were developed for equipping the container with gas venting, excess pressure relief, and fire suppression systems.

Keywords: lithium-ion batteries, thermal runaway, fire resistance, protective container, numerical simulation, Elcut, multilayer structure, thermal insulation

For citation: Stolyarov S.O., Krutolapov A.S., Minkin D.Yu. Assessment of fire resistance and fire hazard of protective containers under conditions of combustion of lithium-ion batteries // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2026. № 3 (79). P. 144–159. DOI: 10.61260/1998-8990-2026-3-144-159

Введение

Пожарная опасность литий-ионных аккумуляторов (ЛИА) связана с неконтролируемой экзотермической реакцией. Отличительной особенностью горения ЛИА является скорость тепловыделения, превышающая теплоотвод (тепловой разгон). Данная особенность приводит к быстрому повышению температуры с последующим возгоранием и взрывом. Кислород который выделяется в результате экзотермической реакции при нагреве более 180 °С, поддерживает горение, что приводит к неэффективности использования огнетушащих веществ [1].

В качестве опасных факторов пожара ЛИА можно выделить: повышенную концентрацию токсичных продуктов горения, снижение видимости в дыму, опасные факторы взрыва, повышенная температура окружающей среды и тепловой поток [2, 3].

В России растёт количество устройств на ЛИА, что приводит к увеличению пожаров. Из-за сложности тушения наиболее эффективна изоляция и охлаждение аккумуляторов. Решение – разработка защитного контейнера (саркофага) для безопасного хранения повреждённых батарей на промышленных предприятиях с пассивной термической изоляцией на 120 мин [4].

Решение данной задачи возможно посредством разработки защитного контейнера (саркофага), обеспечивающего безопасное хранение повреждённых ЛИА батарей в условиях промышленного предприятия путём пассивной термической изоляции и предотвращения распространения пожара в течение 120 мин [5].

Объект исследования – огнестойкость изоляции защитного контейнера ЛИА батарей на промышленных объектах.

Предмет исследования – конструктивные и теплотехнические параметры многослойного контейнера-саркофага (состав, толщина и теплофизические свойства слоёв из керамики, базальтовой плиты и стали), обеспечивающие его огнестойкость (по критерию потери теплоизолирующей способности) в течение 120 мин при высокотемпературном воздействии, соответствующем условиям горения ЛИА.

Цель исследования – научное обоснование конструктивных и теплотехнических параметров защитного контейнера-саркофага, обеспечивающего пассивную локализацию тепловых последствий аварийного теплового разгона ЛИА батарей путём поддержания огнестойкости ограждающих конструкций.

Для достижения цели предполагалось решить следующие частные задачи:

– исследовать температурный режим пожара ЛИА;

– обосновать выбор конструкционных и теплоизоляционных материалов на основе их теплофизических свойств и способности сохранять теплоизолирующую способность при длительном высокотемпературном воздействии;

– решить теплофизическую задачу с использованием данных по теплофизическим характеристикам средств изоляции в условиях высокотемпературного воздействия;

– разработать рекомендации по дополнительному оснащению контейнера для обеспечения комплексной безопасности при хранении аварийных ЛИА.

Материалы методы исследования

Огнестойкость оценивается по критерию потери теплоизолирующей способности (I): превышение температуры на необогреваемой поверхности более чем на 140 °С в среднем или 180 °С в любой точке относительно начальной либо более 220 °С независимо от начальной температуры (ГОСТ Р 30247.0–94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость») [6].

Конструктивная схема саркофага для ЛИА представляет раму на металлическом каркасе из трубы квадратного сечения. Жесткость каркаса обеспечивается горизонтальными и вертикальными ребрами жесткости (рис. 1).

Ограждающая конструкция саркофага является многослойной и формируется наращиванием слоёв наружу от рабочей полости. Такой подход обусловлен функциональным назначением изделия: внутренний объём определяется габаритами защищаемого изделия и не может быть уменьшен за счёт толщины ограждающих конструкций без нарушения условий размещения аккумуляторных батарей. Толщина и состав стенки приняты по результатам теплотехнического расчёта, обеспечивающего сохранение теплоизолирующей способности конструкции в течение 120 мин [7].

Каркас представляет собой многослойную систему изоляции, которая состоит из:

1 – керамическая плита 30 мм;

2 – сталь 3 мм;

3 – плита базальтовая 50 мм;

4 – сталь 2 мм (рис. 2).

В целях повышения надежности работы системы предлагается дополнительное оснащение, так как изоляции недостаточно. Саркофаг обязательно должен включать:

– систему газоотвода с фильтрацией и, возможно, дожигом газов (CO, H_2, электролиты);

– клапаны избыточного давления, чтобы контейнер не разорвало;

– систему пожаротушения (аэрозольную или водяное охлаждение);

– терморазрыв и уплотнения: огнеупорный расширяющийся уплотнитель по периметру крышки для полной герметизации.

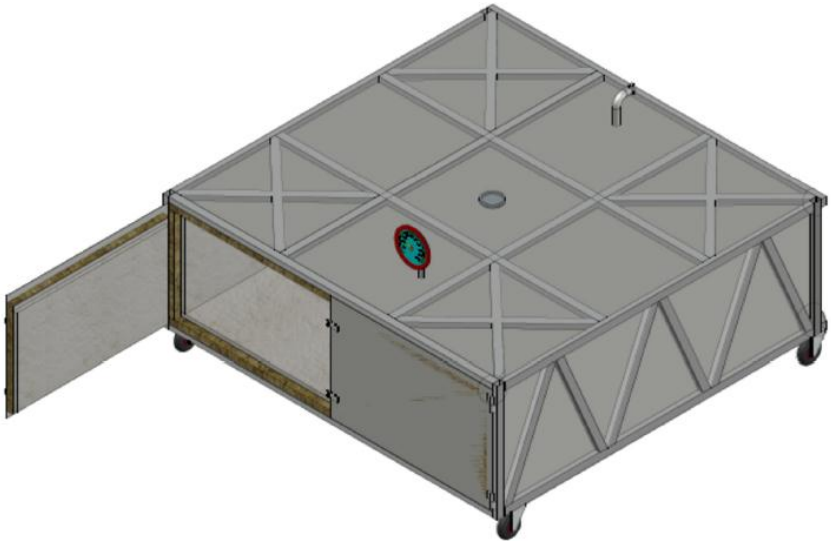


Рис. 1. **Конструктивная схема**

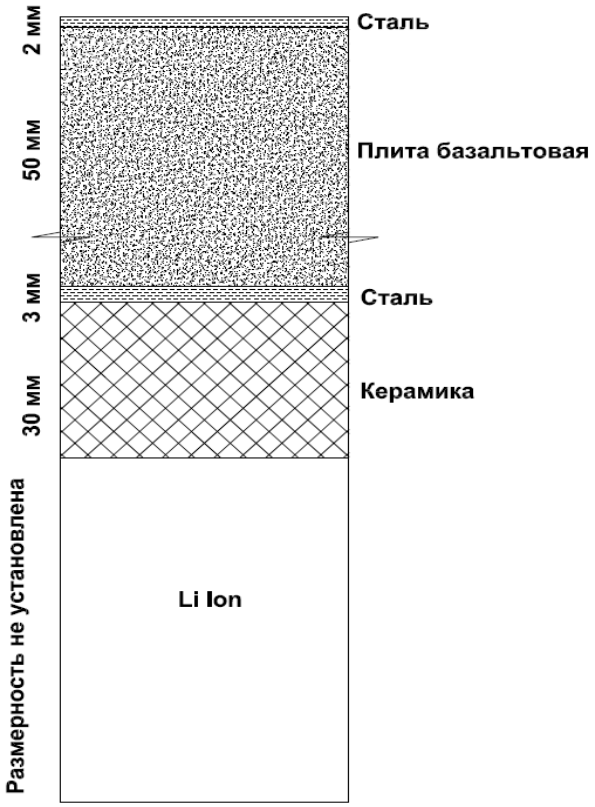


Рис. 2. **Структурная схема изоляции**

Ввиду отсутствия нормативных значений температурного режима пожара ЛИА представляется необходимым подобрать аналог, схожий по своим характеристикам.

Выбор углеводородного температурного режима (ГОСТ Р ЕН 1363-2–2014 «Конструкции строительные. Испытания на огнестойкость. Альтернативные и дополнительные методы») в качестве аналога для моделирования пожара ЛИА основывается на ключевых параметрах реальных условий теплового разгона и горения ЛИА.

Пожар ЛИА характеризуется крайне высокими температурами, которые полностью соответствуют диапазону углеводородного пожара:

– температура углеводородного пожара: этот режим моделирует пожары с быстрым ростом температуры до ~1 100 °С в течение первых 5 мин;

– температура пожара ЛИА: при тепловом разгоне температура внутри и в факеле пламени ЛИА достигает от 600 до 1 100 °С, а в некоторых случаях превышает 1 200 °С;

– быстрый нагрев: углеводородный режим моделирует пожары с быстрым ростом температуры. Тепловой разгон ЛИА также является высокоинтенсивным процессом;

– скорость распространения: высокая скорость нагрева при углеводородном пожаре схожа со скоростью распространения теплового разгона между ячейками в аккумуляторном блоке.

Расчет производится при условии изменения температуры нагревающей среды во времени по кривой «углеводородного пожара» (ГОСТ 1363-2–2014), уравнение которой имеет вид:

$$t_{в,\tau} = \left(1280 \times \left(1 - 0{,}325 \times exp\left(-0{,}167 \times \frac{t}{60}\right)\right)\right) + 20, \quad (1)$$

где $t_{в,\tau}$ – температура нагревающей среды, °К; τ – время в секундах; $t_н$ – начальная температура нагревающей среды, °К.

Расчет температуры изоляции производится с помощью ЭВМ с использованием программ, апробированных для решения задач нестационарной теплопроводности.

Программа для расчета составляется по алгоритму, который представляет собой ряд формул, полученных на основе решения краевой задачи теплопроводности методом элементарных балансов.

Начальные условия

Начальная температура во всех точках сечения конструкции ($t_{ст}$, t_0) и температура окружающей среды ($t_в$) до теплового воздействия одинакова и равна 293 °К.

Для плоских конструкций с одномерным потоком тепла по толщине алгоритм машинного расчета составляется на основании схемы, изображенной на рис. 3. Огнезащитная облицовка толщиной σ_0 разбивается на n-е число слоев Δx.

Температура на стальной пластине – $\Delta\tau$ вычисляется по формулам:

– температура на обогреваемой поверхности облицовки:

$$\boldsymbol{\tau_{0,\Delta\tau} = \frac{2\Delta\tau\left[A(t_1 - t_0) + 0.5B\left(t_1^2 - t_0^2\right) + \alpha(t_в - t_0)\Delta x\right]}{\gamma_0 \Delta x^2 (C + D_{t0})} + t_0 - t_ф};$$

– температура во внутренних слоях облицовки:

$$\boldsymbol{\tau_{n,\Delta\tau} = \frac{\Delta\tau\left[A(t_{n-1} - 2t_n + t_{n+1}) + 0.5B\left(t_{n-1}^2 - 2t_n^2 + t_{n+1}^2\right)\right]}{\gamma_0 \Delta x^2 (C + D_{tn})} + t_n - t_ф};$$

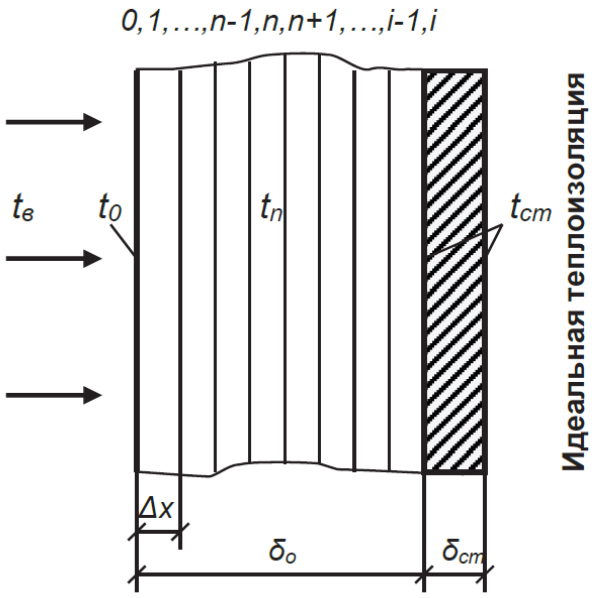


Рис. 3. **Схема к расчету на ЭВМ прогрева стальной пластины**

– температура на стальной пластине:

$$\boldsymbol{\tau_{cm,\Delta\tau}} = \frac{2\Delta\tau\left[A(t_n - t_{cm}) + 0.5\text{B}(t_n^2 - t_{cm}^2)\right]}{\Delta x[\gamma_0 \Delta x(C + Dt_{cm}) + 2\gamma_{cm}\delta_{cm}(C_{cm} + D_{cm}t_{cm})]} + t_{cm} - t_{\text{ф}},$$

где A – начальный коэффициент теплопроводности облицовки, Вт/(мград); B – коэффициент изменения теплопроводности облицовки при нагреве, Вт/(м град^2); C – начальный коэффициент теплоемкости облицовки, Дж/(кг град); D – коэффициент изменения теплоемкости облицовки при нагреве, Дж/(кг град^2);

– фиктивная температура:

$$t_{\text{ф}} = \frac{p_{\text{в}} r}{100\left[(C + Dt_{cm}) + \frac{2\gamma_{cm}\delta_{cm}(C_{cm} + D_{cm}t_{cm})}{\gamma_0 \Delta x}\right]},$$

где $p_в$ – начальная весовая влажность облицовки, %; r – скрытая теплота парообразования воды, r=2260·10³ Дж/кг.

Для определения температуры на необогреваемой поверхности саркофага для ЛИА произведен теплотехнический расчет с использованием программного продукта «Elcut». Для решения поставленной задачи был выбран ее тип – теплопередача нестационарная. Расчет производится до 7 200 с с шагом в 60 с. Начальная температура составляет 20 °С.

Для нелинейного материала, такого, как сталь, базальтовый материал были построены графики зависимости теплоемкости и теплопроводности.

Для обогреваемой поверхности задается метка блока ребер. В свойствах блока задается значение температур для углеводородного пожара по формуле (1).

Задается сетка расчетов. Выделяется расчетная площадь, задается шаг сетки автоматически.

Теплотехнические характеристики материалов представлены на рис. 4–9.

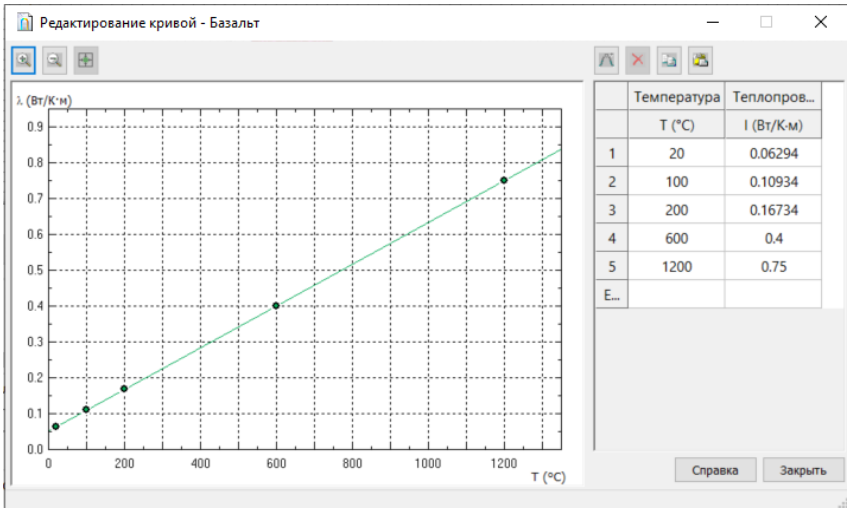


Рис. 4. **График зависимости теплопроводности базальтового материала от температуры (ρ=100 кг/м^3)**

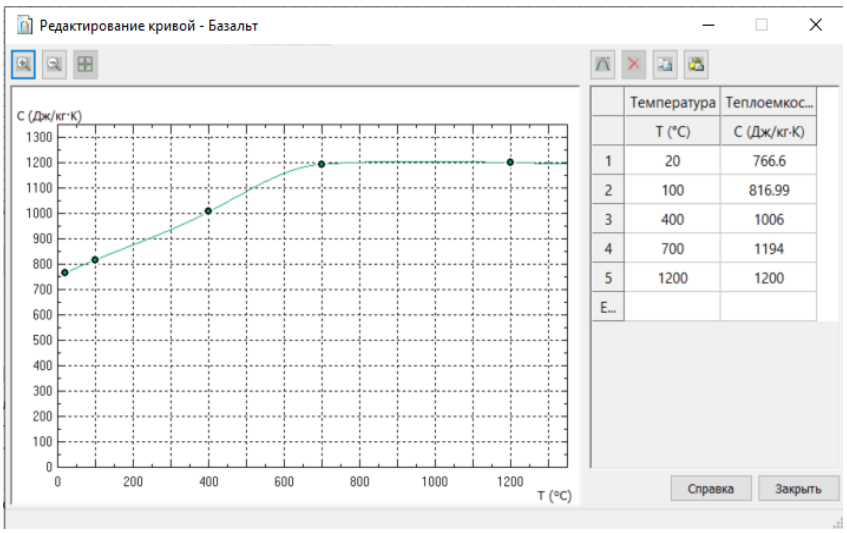


Рис. 5. **График зависимости теплоемкости базальтового материала от температуры (ρ=100 кг/м^3)**

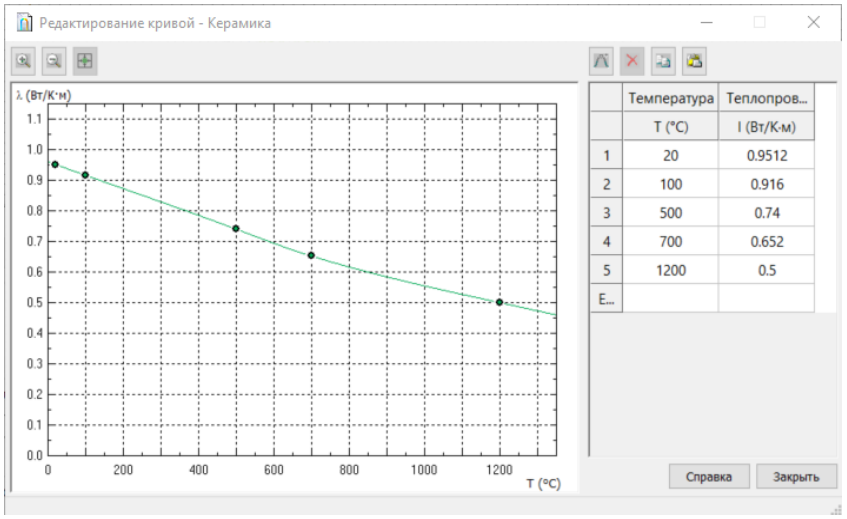


Рис. 6. **График зависимости теплопроводности керамической плиты от температуры (ρ=1 930 кг/м^3)**

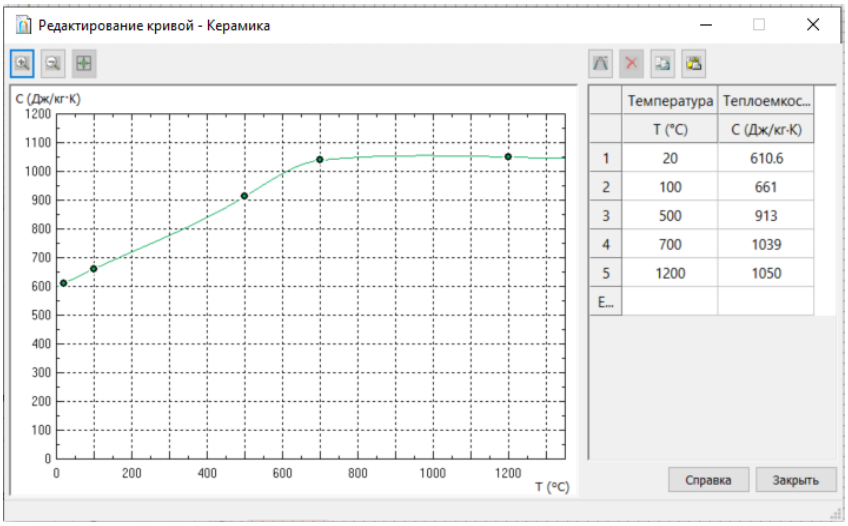


Рис. 7. **График зависимости теплоемкости керамической плиты от температуры (ρ=1 930 кг/м^3)**

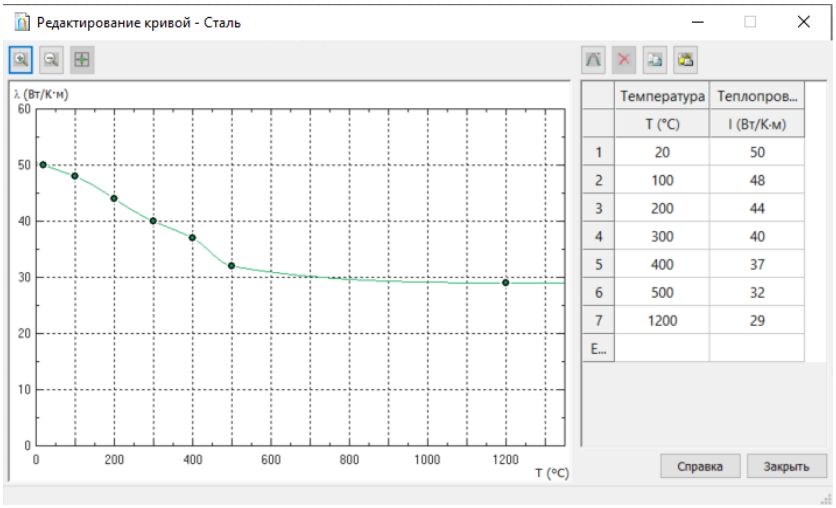


Рис. 8. **График зависимости теплопроводности стали от температуры (ρ=7 850 кг/м^3)**

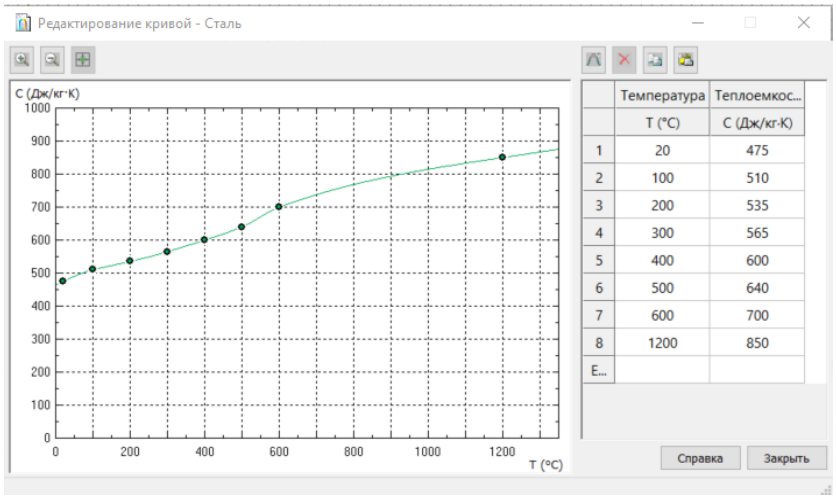
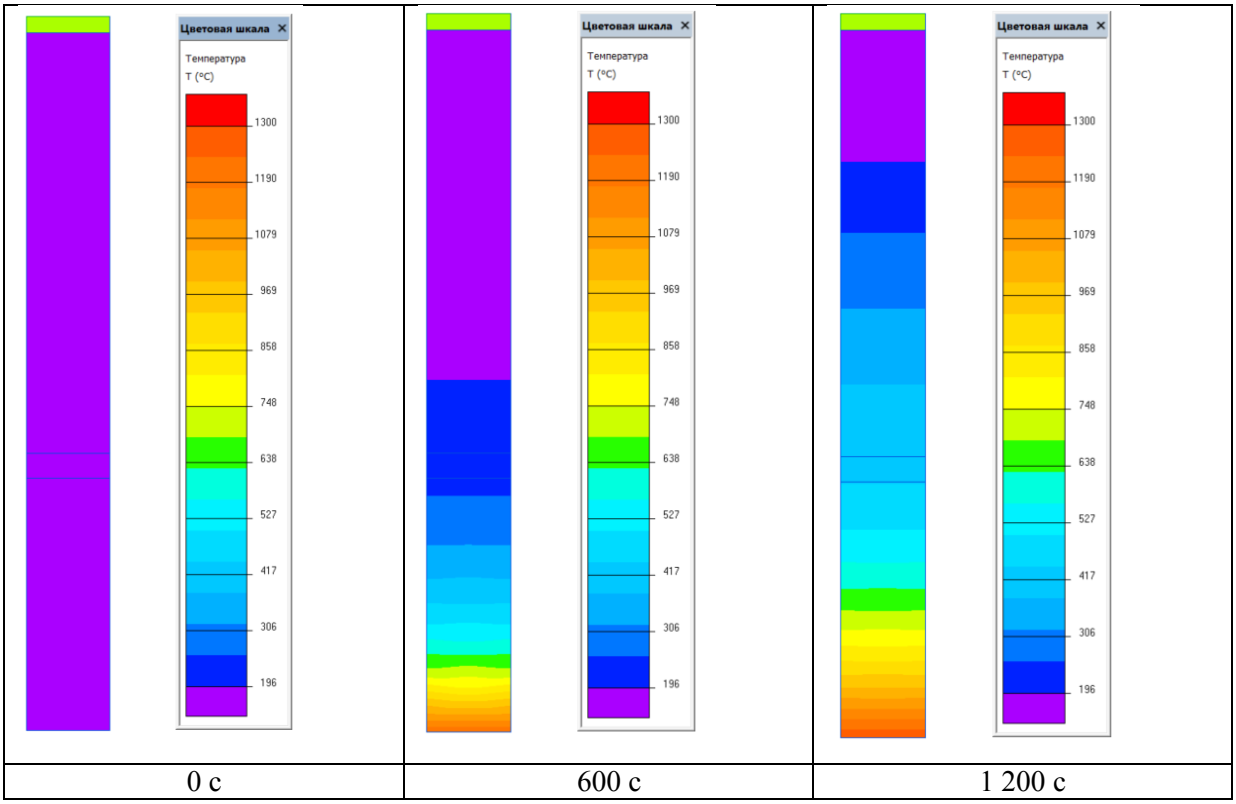


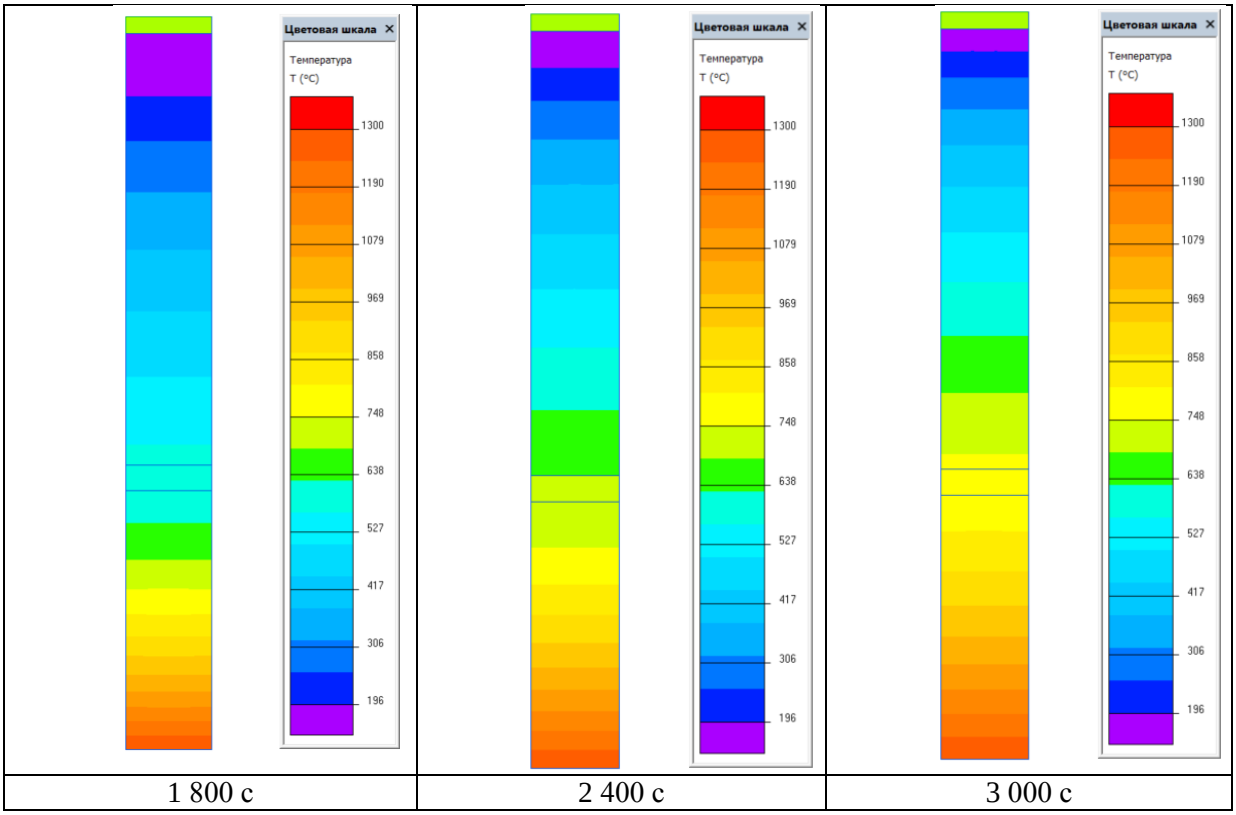
Рис. 9. **График зависимости теплоемкости стали от температуры (ρ=7 850 кг/м^3)**

Результаты теплотехнического расчета представлены на рис. 10–14. Температура материала измерялась в месте наибольшего термического воздействия.



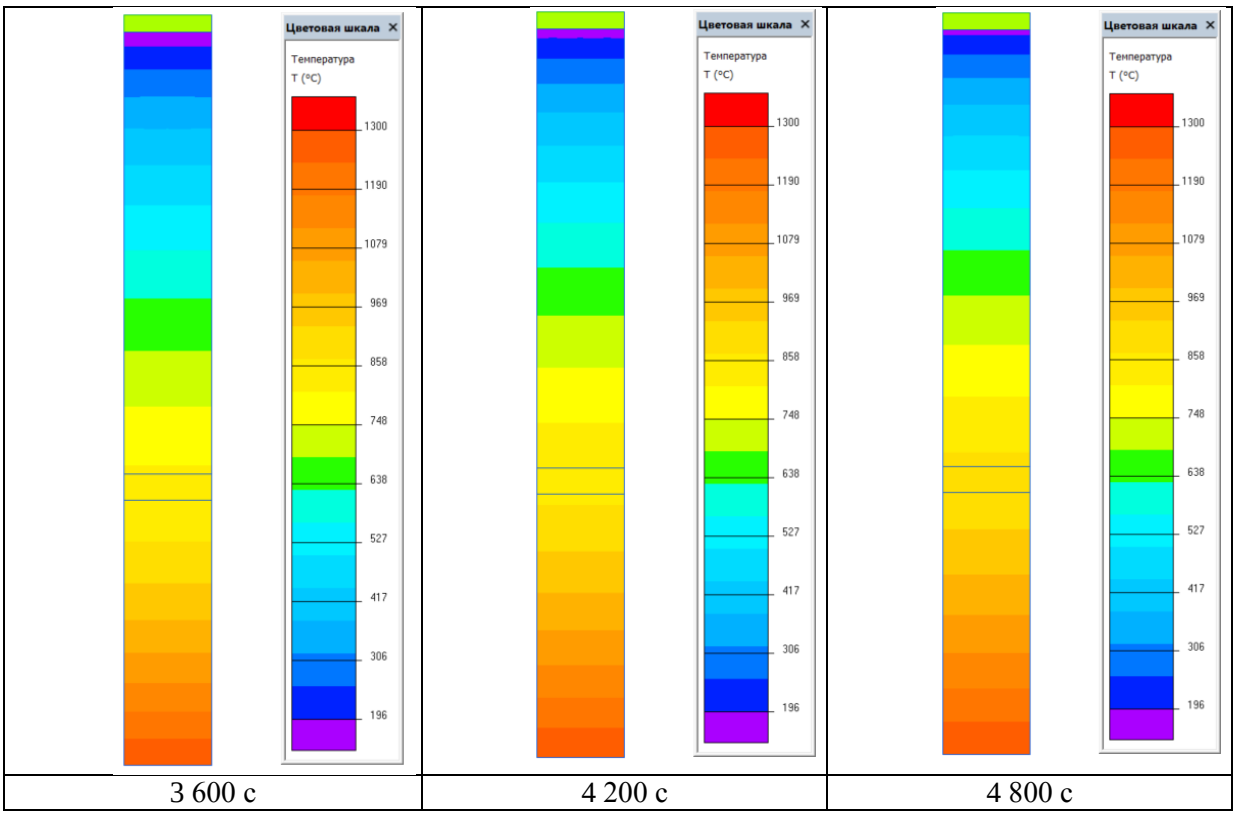
0 с	600 с	1 200 с

Рис. 10. **Модель прогрева стенки саркофага в условиях высокотемпературного воздействия горения ЛИА**



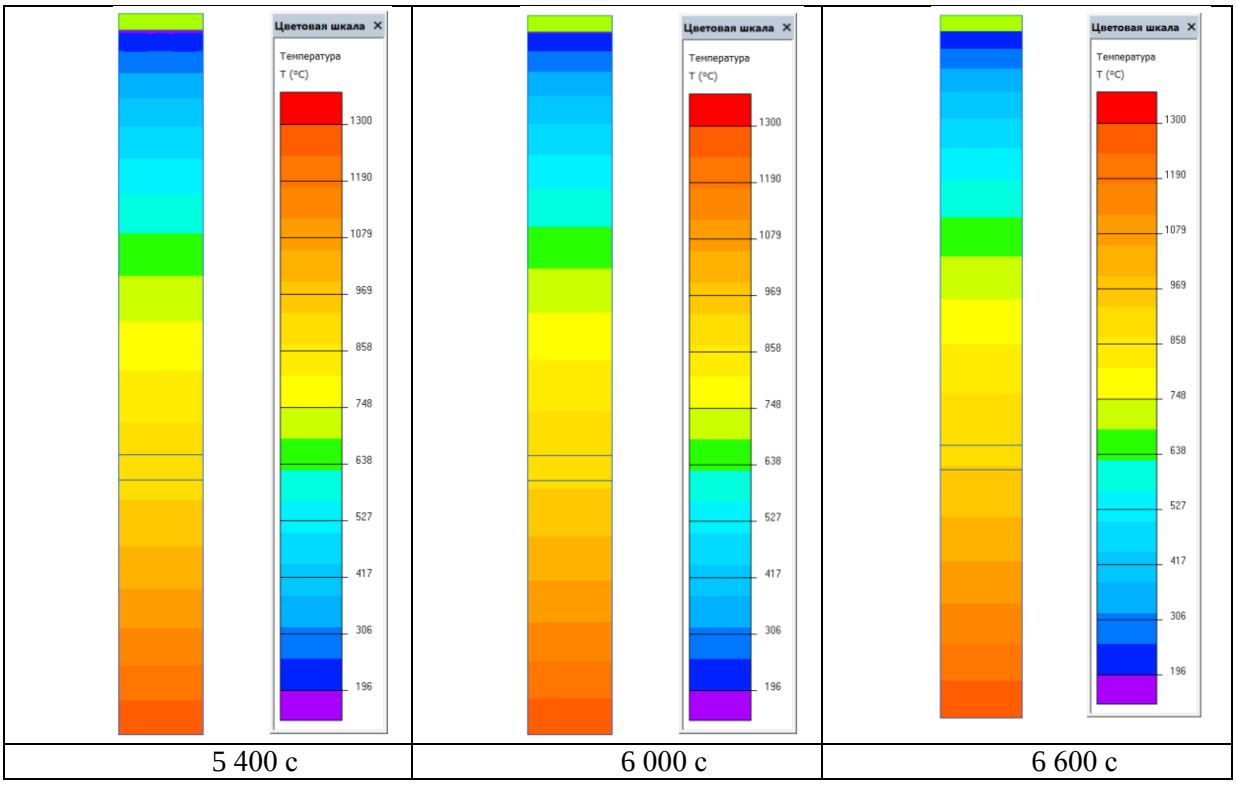
1 800 с	2 400 с	3 000 с

Рис. 11. **Модель прогрева стенки саркофага в условиях высокотемпературного воздействия горения ЛИА**



3 600 с	4 200 с	4 800 с

Рис. 12. **Модель прогрева стенки саркофага в условиях высокотемпературного воздействия горения ЛИА**



5 400 с	6 000 с	6 600 с

Рис. 13. **Модель прогрева стенки саркофага в условиях высокотемпературного воздействия горения ЛИА**

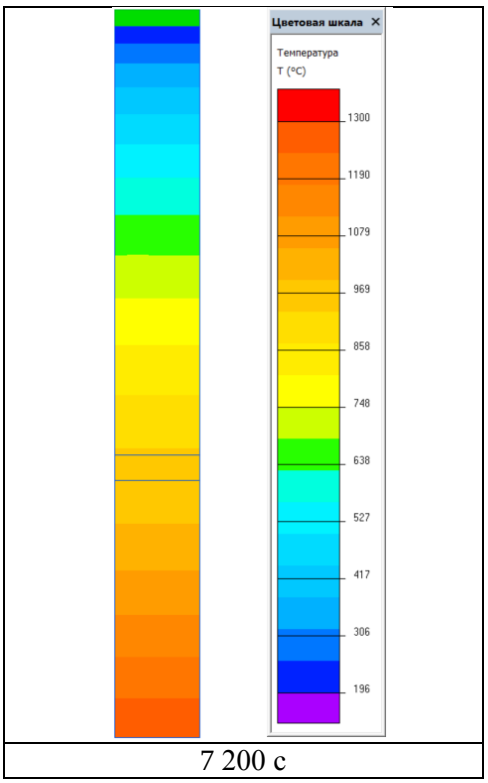


Рис. 14. **Модель прогрева стенки саркофага в условиях высокотемпературного воздействия горения ЛИА**

Результаты исследования

Совокупный анализ результатов расчетной модели прогрева изоляции показывает, что многослойная конструкция стенки саркофага способна выдерживать высокотемпературное воздействие горения ЛИА в течение 120 мин без превышения критической температуры 220 °С на необогреваемой поверхности. Керамический слой обеспечивает первичную защиту от прямого воздействия пламени, базальтовая плита выполняет функцию основного теплоизолятора, а внешний стальной лист обеспечивает механическую прочность и выполняет роль барьера для продуктов горения.

Обобщенные данные прогрева отдельных элементов в виде графических изображений представлены на рис. 15–18.

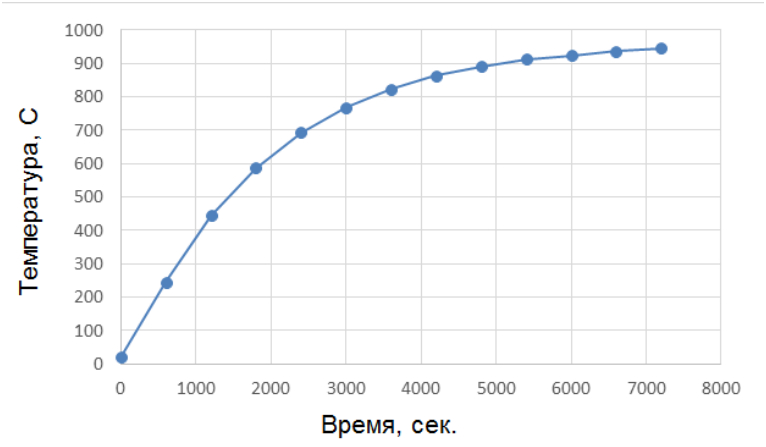


Рис. 15. **График прогрева стенки саркофага в условиях высокотемпературного воздействия горения ЛИА (керамика 30 мм)**

Кривая имеет характерную форму: в первые 1 000–1 500 с наблюдается интенсивный рост температуры от 20 °С до 450–500 °С, обусловленный высокой теплопроводностью материала и прямым контактом с зоной горения. Далее скорость прогрева снижается, и к 3 600 с температура достигает 800 °С. По окончанию расчетного времени температура выравнивается.

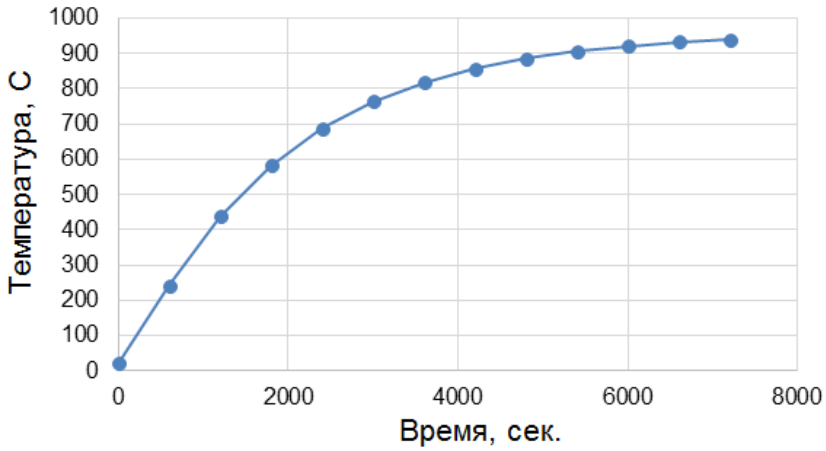


Рис. 16. **График прогрева стенки саркофага в условиях высокотемпературного воздействия горения ЛИА (сталь 3 мм внутренней стенки)**

Температура стали ввиду высокой теплопроводности практически повторяют скорость нагрева керамики.

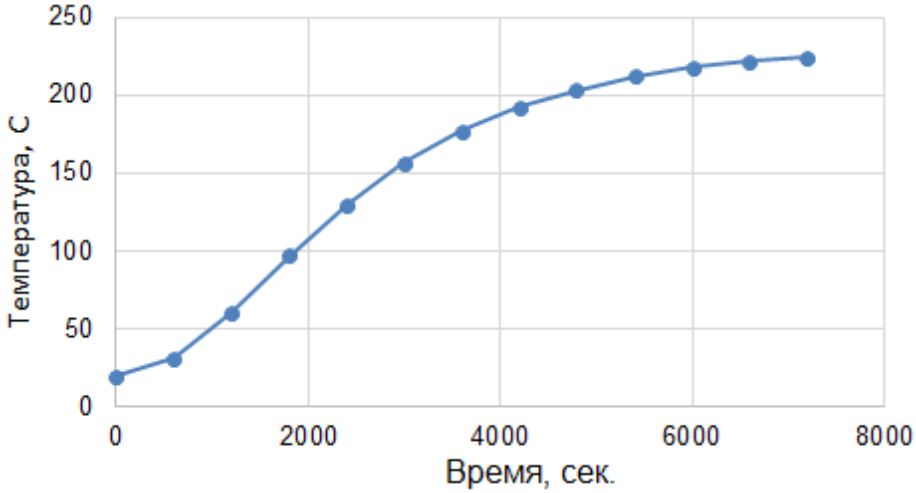


Рис. 17. **График прогрева стенки саркофага в условиях высокотемпературного воздействия горения ЛИА (базальтовая плита 50 мм)**

В отличие от керамики и стали, базальтовая плита характеризуется низкой теплопроводностью (0,05–0,15 Вт/(м·К) и высокой теплоёмкостью, что определяет её роль как основного теплоизоляционного слоя. Температура растёт значительно медленнее: к 1 800 с она достигает лишь 80–100 °С, к 3 600 с – 150 °С, к 5 400 с – 190 °С. К 7 200 с температура стабилизируется на уровне 220–230 °С, что находится в пределах допустимого значения по потере теплоизолирующей способности.

Скорость прогрева базальтового слоя значительно ниже, стали и керамики вследствие низкой теплопроводности (0,05–0,15 Вт/(м*К) и высокой теплоемкости. По окончании нормативного времени температура на необогреваемой поверхности составляет 220–230 °С.

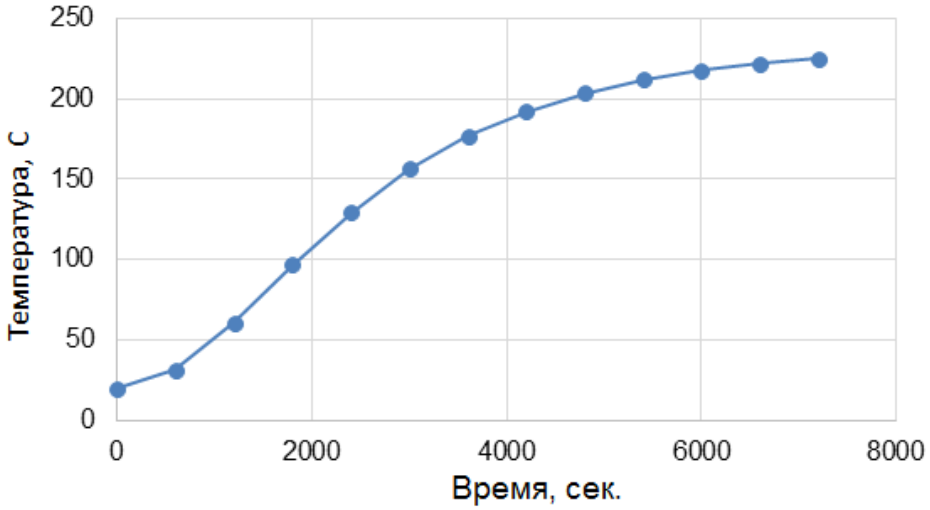


Рис. 18. **График прогрева стенки саркофага в условиях высокотемпературного воздействия горения ЛИА (сталь 2 мм наружной облицовки)**

Можно сделать следующий вывод: теплоизоляция защитного слоя контейнера в условиях горения ЛИА способна обеспечить предел огнестойкости EI 120. Внутреннее давление не учитывается ввиду наличия и работы клапана.

Ниже представлены рекомендации по эксплуатации и дополнительному оснащению контейнера для обеспечения комплексной безопасности при хранении аварийных ЛИА.

Контроль состояния саркофага

Термометр – установлен на внешней стороне. Периодический контроль температуры (не реже 1 раза в смену) для раннего обнаружения перегрева.

Визуальный контроль – регулярно осматривать наружную поверхность на предмет изменения цвета, деформации, следов копоти или трещин.

Контроль клапана давления – убедиться в отсутствии механических повреждений разрывной мембраны и её чистоте (отсутствие загрязнений, накипи).

Проверка герметичности – при вводе в эксплуатацию и далее ежегодно проверять уплотнительную ленту на эластичность и целостность, при необходимости заменять.

Система газоотвода с фильтрацией и/или дожигом – для отвода горючих и токсичных газов (CO, H_2, пары электролита) из внутреннего объёма. Сброс – через разрывную мембрану с рабочим давлением срабатывания ~5 кПа (или аналог). Рекомендуется установка керамического проставочного элемента перед мембраной для снижения температуры газов с 1200 °С до ~1000 °С на металле.

Клапан избыточного давления – для предотвращения разрыва корпуса при интенсивном газовыделении.

Огнеупорный терморасширяющийся уплотнитель – по периметру дверей, обеспечивающий герметичность при температуре >200 °С.

Система аэрозольного или водяного пожаротушения – в качестве активного резерва (дополнительный модуль, срабатывающий при превышении температуры внутри саркофага более 250 °С). Допускается использование микрокапсулированных огнетушащих веществ в виде самоклеящихся листов на внутренней поверхности крышки.

Обсуждение результатов исследования

Выбор углеводородного температурного режима (ГОСТ Р ЕН 1363-2–2014) в качестве расчётного аналога пожара ЛИА обусловлен тем, что реальные условия теплового разгона характеризуются быстрым ростом температуры до 1 100–1 200 °С в первые минуты процесса. Это подтверждается исследованиями [8–12]. Известно, что при тепловом разгоне температура внутри факела пламени ЛИА достигает значений, сопоставимых с углеводородным пожаром. Вместе с тем следует отметить, что реальный пожар ЛИА является более сложным процессом, сопровождающимся выделением горючих газов и токсичных продуктов, что накладывает дополнительные требования к герметичности и газоотводу, которые в рамках данной теплотехнической задачи не учитывались.

Результаты численного моделирования (рис. 10–14) показывают, что предложенная многослойная конструкция (керамика 30 мм – сталь 3 мм – базальтовая плита 50 мм – сталь 2 мм) обеспечивает эффективное снижение температуры [13]. Базальтовая плита толщиной 50 мм выступает в качестве основного средства огнезащиты. Графики прогрева отдельных элементов (рис. 15–18) демонстрируют разницу в скорости нагрева: керамика и внутренняя сталь достигают температур 900–950 °С уже к 3 600 с, базальтовая плита прогревается до 220 °С к концу нормативного времени (7 200 с). Керамика и сталь используются для непосредственного контакта с пламенем, а базальтовая плита – для защиты наружной облицовки [14].

Моделирование показало, что через 120 мин теплового воздействия температура на наружной поверхности саркофага достигает 220 °С, что соответствует предельному значению по критерию потери теплоизолирующей способности (I) согласно ГОСТ Р 30247.0.

Проведённое исследование ограничивается только теплотехнической задачей и не учитывает ряд факторов, влияющих на пожарную безопасность. В связи с этим предложенные рекомендации по дополнительному оснащению саркофага (системы газоотвода, клапаны избыточного давления, системы пожаротушения) являются обязательными для практического применения [15].

Ниже представлены результаты подтверждают принципиальную работоспособность предложенной конструкции и создают основу для её дальнейшего совершенствования и экспериментальной валидации.

Вывод

Исследован температурный режим пожара ЛИА.

Обоснован выбор конструкционных и теплоизоляционных материалов на основе их теплофизических свойств и способности сохранять теплоизолирующую способность при длительном высокотемпературном воздействии.

Решена теплофизическая задача с использованием данных по теплофизическим характеристикам средств изоляции в условиях высокотемпературного воздействия.

Разработаны рекомендации по дополнительному оснащению контейнера для обеспечения комплексной безопасности при хранении аварийных ЛИА.

Список источников

1. Орлов О.И., Комельков В.А. Пожарная опасность литий-ионных аккумуляторов // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 4 (49). С. 177–189.

2. Combustion behavior and quantitative analysis of fire risk for lithium-ion batteries with different SOC / J. Liu [et al.] // Applied Thermal Engineering. 2025. С. 129613.

3. Comparative fire hazards of lithium-ion battery chemistries: Linking thermal behavior, gas toxicity, and state-of-charge to composite risk profiles / A. Iqbal [et al.] // Journal of Power Sources. 2025. Vol. 655. P. 237914.

4. A study on chemical kinetics of carbonates-based electrolytes for enhancing fire safety in lithium-ion batteries – A review / G.A. Gohar [et al.] // Journal of Energy Storage. 2025. Т. 131. С. 117492.

5. Кашин Н.В., Губайдуллина И.Н. Пожарная опасность литий-ионных аккумуляторов // Вестник Астраханского государственного университета им. В.Н. Татищева. 2026. № 1 (44). С. 24.

6. Белоусова К.А. Теплоизоляционные керамические материалы в строительстве: свойства и применение // Вестник науки. 2025. Т. 3. № 12 (93). С. 1529–1539.

7. Астахина Ю.А, Королева Л.А. Типология причин, приводящих к возгоранию литий-ионных аккумуляторов электромобилей // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 3. С. 122–132.

8. Оценка эффективности применения составов для тушения пожаров литий-ионных аккумуляторных батарей / О.В. Двоенко [и др.] // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2024. № 4. С. 55–63.

9. Накопитель электроэнергии на основе литий-ионных аккумуляторов мегаваттного класса мощности / П.В. Боровиков [и др.] // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2017. № 3. С. 38–43.

10. Харламенков А.С. Пожарная опасность применения литий-ионных аккумуляторов в России // Пожаровзрывобезопасность. 2022. Т. 31. № 3. С. 96–102.

11. Предварительное исследование пожароопасных свойств литий-ионных аккумуляторов / Д.И. Терентьев [и др.] // Техносферная безопасность. 2024. № 3. С. 44.

12. Пожарная опасность литий-ионных аккумуляторных батарей / В.Е. Горский [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2026. № 1 (58). С. 28–37.

13. Мельник А.А., Елисеев Ю.Н., Мокряк А.В. Основные факторы, провоцирующие пожарную опасность литий-ионных аккумуляторов // Техносферная безопасность. 2021. № 2 (31). С. 113–116.

14. Орлов О.И., Комельков В.А. Пожарная опасность литий-ионных аккумуляторов // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 4 (49). С. 177–189.

15. Канонин Ю.Н., Лыщик А.В. Пожарная опасность электромобилей // Бюллетень результатов научных исследований. 2023. № 1. С. 38–51.

References

1. Orlov O.I., Komel'kov V.A. Pozharnaya opasnost' litij-ionnyh akkumulyatorov // Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity. 2023. № 4 (49). S. 177–189.

2. Combustion behavior and quantitative analysis of fire risk for lithium-ion batteries with different SOC / J. Liu [et al.] // Applied Thermal Engineering. 2025. S. 129613.

3. Comparative fire hazards of lithium-ion battery chemistries: Linking thermal behavior, gas toxicity, and state-of-charge to composite risk profiles / A. Iqbal [et al.] // Journal of Power Sources. 2025. Vol. 655. P. 237914.

4. A study on chemical kinetics of carbonates-based electrolytes for enhancing fire safety in lithium-ion batteries – A review / G.A. Gohar [et al.] // Journal of Energy Storage. 2025. T. 131. S. 117492.

5. Kashin N.V., Gubajdullina I.N. Pozharnaya opasnost' litij-ionnyh akkumulyatorov // Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo universiteta im. V.N. Tatishcheva. 2026. № 1 (44). S. 24.

6. Belousova K.A. Teploizolyacionnye keramicheskie materialy v stroitel'stve: svojstva i primenenie // Vestnik nauki. 2025. T. 3. № 12 (93). S. 1529–1539.

7. Astahina Yu.A, Koroleva L.A. Tipologiya prichin, privodyashchih k vozgoraniyu litij-ionnyh akkumulyatorov elektromobilej // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2025. № 3. S. 122–132.

8. Ocenka effektivnosti primeneniya sostavov dlya tusheniya pozharov litij-ionnyh akkumulyatornyh batarej / O.V. Dvoenko [i dr.] // Pozhary i chrezvychajnye situacii: predotvrashchenie, likvidaciya. 2024. № 4. S. 55–63.

9. Nakopitel' elektroenergii na osnove litij-ionnyh akkumulyatorov megavattnogo klassa moshchnosti / P.V. Borovikov [i dr.] // Elektro. Elektrotekhnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost'. 2017. № 3. S. 38–43.

10. Harlamenkov A.S. Pozharnaya opasnost' primeneniya litij-ionnyh akkumulyatorov v Rossii // Pozharovzryvobezopasnost'. 2022. T. 31. № 3. S. 96–102.

11. Predvaritel'noe issledovanie pozharoopasnyh svojstv litij-ionnyh akkumulyatorov / D.I. Terent'ev [i dr.] // Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2024. № 3. S. 44.

12. Pozharnaya opasnost' litij-ionnyh akkumulyatornyh batarej / V.E. Gorskij [i dr.] // Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity. 2026. № 1 (58). S. 28–37.

13. Mel'nik A.A., Eliseev Yu.N., Mokryak A.V. Osnovnye faktory, provociruyushchie pozharnuyu opasnost' litij-ionnyh akkumulyatorov // Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2021. № 2 (31). S. 113–116.

14. Orlov O.I., Komel'kov V.A. Pozharnaya opasnost' litij-ionnyh akkumulyatorov // Sovremennye problemy grazhdanskoj zashchity. 2023. № 4 (49). S. 177–189.

15. Kanonin Yu.N., Lyshchik A.V. Pozharnaya opasnost' elektromobilej // Byulleten' rezul'tatov nauchnyh issledovanij. 2023. № 1. S. 38–51.

Информация о статье:
Статья поступила в редакцию: 20.08.2026; одобрена после рецензирования: 08.09.2026;
принята к публикации: 11.09.2026

The information about article:
The article was submitted to the editorial office: 20.08.2026; approved after review: 08.09.2026;
accepted for publication: 11.09.2026

Информация об авторах:
Столяров Святослав Олегович, доцент кафедры пожарной безопасности зданий и автоматизированных систем пожаротушения Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, e-mail: 79990252529@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-6460-209X, SPIN-код: 9196-5570
Крутолапов Александр Сергеевич, профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, доцент, e-mail: krut75@mail.ru, SPIN-код: 7822-1555
Минкин Денис Юрьевич, председатель комитета по транспорту Санкт-Петербурга (191024, Санкт-Петербург, Исполкомская ул., д. 16, лит. А), доктор технических наук, профессор, e-mail: dunkel@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4651-8526, SPIN-код: 7698-0168

Information about the authors:
Stolyarov Svyatoslav O., associate professor at the department of building fire safety and automated fire fighting systems of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of technical sciences, e-mail: 79990252529@yandex.ru, https://orcid.org/0000-0002-6460-209X, SPIN: 9196-5570
Krutolapov Alexander S., professor of the department of fire and emergency rescue equipment and automotive facilities of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, associate professor, e-mail: krut75@mail.ru, SPIN: 7822-1555
Minkin Denis Yu., chairman of the Transport committee of Saint-Petersburg (191024, Saint-Petersburg, Ispolkomskaya st., bld. 16, lit. A), doctor of technical sciences, professor, e-mail: dunkel@mail.ru, https://orcid.org/0000-0003-4651-8526, SPIN: 7698-0168