

## ОЦЕНКА РАСЧЕТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГОРЕНИЯ, НЕОБХОДИМЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЖАРОВ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ FDS

Кудряшов В.А., Иванов С.В., Кобяк В.В.

*Цель.* На основании анализа реальных пожаров легковых автомобилей, натуральных экспериментов определить основные расчетные параметры горения для моделирования пожаров легковых автомобилей и теоретической оценки тепловых потоков и температур перекрытия при пожаре.

*Методы.* Сопоставление параметров реальных пожаров легковых автомобилей с натурными экспериментами. Формулирование расчетных параметров горения для моделирования в программной среде FDS.

*Результаты.* Натурные эксперименты с использованием реальных легковых автомобилей показали: при пожарах нескольких легковых автомобилей распространение пламени на соседний автомобиль происходит по времени за 8–10 мин с момента возникновения пожара; максимальная мощность тепловыделения достигает 10,8 МВт, причем время достижения этой мощности может варьироваться от 8 (при пожаре одного автомобиля) до 25 мин (при одновременном пожаре двух автомобилей). Среднее значение теплоты сгорания автомобиля составляет 15 МДж/кг, а температуры при таких пожарах доходят до 1100 °С.

*Область применения исследований.* Полученные результаты могут быть использованы при моделировании пожаров легковых автомобилей и оценке воздействия на строительные конструкции, что позволит повысить уровень пожарной безопасности гаражей-стоянок.

*Ключевые слова:* огнестойкость, гараж-стоянка, перекрытие, легковой автомобиль, компьютерное моделирование, мощность тепловыделения, параметры горения, FDS.

(Поступила в редакцию 5 октября 2023 г.)

### Введение

С каждым годом чрезвычайные ситуации техногенного характера становятся все большим вызовом для экстренных служб, занимающихся ликвидацией ЧС и их последствий [1]. Новые вещества и материалы, используемые в производстве, постоянно расширяющиеся области применения новых технологий и степень их распространения как в специализированных отраслях, так и в повседневной жизни – все это становится источниками повышенной опасности, в том числе при ликвидации современных пожаров и иных чрезвычайных ситуаций.

Одним из самых ярких примеров является современное автомобилестроение. При горении полимерных материалов, применяемых в производстве современных автомобилей, на первый план выходят высокая скорость распространения огня, максимальная температура горения и короткий промежуток времени от начала пожара до достижения максимальной температуры горения [1].

В промышленно развитых странах пожары на автотранспортных средствах составляют 5–12 % от общего числа пожаров. При этом пожары на автомобилях наносят экономический ущерб, создают угрозу жизни и здоровью людям, которые находятся в горящем автомобиле или поблизости от него. Гибель людей при этом достигает 6–15 % от общего количества погибающих на пожарах [2].

При пожарах автомобилей в гаражах-стоянках высокая температура и большая мощность тепловыделения способны оказать интенсивное воздействие на строительные конструкции перекрытий. При длительном времени воздействия тепловых потоков на перекрытия конструкция может потерять несущую способность, что может привести

к полному обрушению здания. Данные факторы, а также токсичность продуктов горения представляют высокую опасность для людей. Для предотвращения указанных ситуаций и разработки мероприятий, направленных на совершенствование мер пожарной безопасности, требуется надежный прогноз пожаров с использованием методов моделирования, их влияния на несущие свойства и целостность перекрытий в ходе прогрева, что невозможно без формулировки расчетных параметров горения.

Время свободного развития пожара ограничено временем его локализации подразделениями МЧС. При этом в случае горения нескольких автомобилей воздействие тепловых потоков на перекрытия продолжится до самой ликвидации пожара ввиду невозможности одновременного тушения большой площади горения. Если до времени полной ликвидации пожара конструкции потеряют несущую способность, то это несет также реальную угрозу жизни и здоровью работников пожарных подразделений.

Для корректной оценки расчетных параметров горения необходимо рассмотреть примеры реальных пожаров, сопоставить данные лабораторных и натурных испытаний, примеров моделирования пожаров легковых автомобилей.

### **Основная часть**

**Причины пожаров автотранспортных средств.** Причины пожаров легковых автомобилей могут быть обусловлены как внутренними факторами, выраженными в виде технических неисправностей агрегатов и систем (нарушения в работе электросети и электрооборудования, трение узлов и деталей, утечка и воспламенение горюче-смазочных материалов), так и внешними воздействиями (поджог, удар молнии, загорание от внешних источников, дорожно-транспортные происшествия)<sup>1</sup> [2; 3].

Пожары автомобилей часто случаются на открытой местности, в том числе на дорогах общего пользования. Однако не исключены пожары автомобилей в тоннелях и зданиях, прежде всего в гаражах-стоянках. Пожар автомобиля в случае горения в стесненных условиях теплообмена сопровождается более высокими температурами по сравнению с пожарами на открытом пространстве [3].

В соответствии с терминологией СН 3.02.03-2019 «Строительные нормы. Станции технического обслуживания транспортных средств. Гаражи-стоянки автомобилей»<sup>2</sup>: гараж-стоянка (паркинг) – одно- или многоэтажное (многоярусное) здание (сооружение), предназначенное для хранения транспортных средств. Хранение автотранспортных средств является основной функцией гаражей-стоянок, что подразумевает плотное размещение легковых автомобилей, способствующее быстрому распространению пожара.

В соответствии с СН 3.02.03-2019 гаражи-стоянки допускается проектировать:

- одноэтажными и многоэтажными (два и более этажа);
- выполненными в подземном, надземном либо сразу в обоих видах (комбинированные);
- отдельно стоящим, встроенным и пристроенным зданием;
- открытого и закрытого типа;
- механизированными, автоматизированными, оборудованными грузовыми лифтами, боксового типа.

Каждый из перечисленных типов гаражей-стоянок может комбинироваться с другими типами, сочетая достоинства и недостатки каждого типа из приведенной классификации.

<sup>1</sup> Об утверждении инструкции о порядке учета пожаров и последствий от них в ОПЧС РБ [Электронный ресурс]: приказ Мин-ва по чрезвычайным ситуациям Респ. Беларусь, 19 сентября 2019 г., № 282 // Онлайн-сервис готовых правовых решений iLex. – Режим доступа: <https://ilex-private.ilex.by> – Дата доступа: 02.10.2021.

<sup>2</sup> Строительные нормы. Станции технического обслуживания транспортных средств. Гаражи-стоянки автомобилей: СН 3.02.03-2019: утв. постановлением Мин-ва архитектуры и строительства Респ. Беларусь от 16 декабря 2019 г. № 69; с изм. от 17.11.22. – Введ. 09.08.21. – Минск: Изд-во стандартов, 2023. – 38 с.

**Оценка обстановки при пожарах в гаражах-стоянках.** Пожары в подземных (закрытых надземных) и открытых надземных паркингах существенно различаются. Подземные (закрытые надземные) паркинги проектируются либо без оконных проемов, либо с их крайне ограниченным количеством. Это обуславливает вероятность пожара, регулируемого нагрузкой, в том числе в объемной стадии. Сложность пожарной обстановки требует для гаражей такого типа систем автоматической пожарной сигнализации и автоматического пожаротушения.

В соответствии с СН 3.02.03-2019<sup>3</sup> при проектировании закрытых гаражей-стоянок автоматическое пожаротушение предусматривается:

- в подземных (независимо от этажности);
- одноэтажных надземных (I–II степеней огнестойкости площадью 7000 м<sup>2</sup> и более; III степени огнестойкости площадью 3600 м<sup>2</sup> и более; IV степени огнестойкости площадью 1000 м<sup>2</sup> и более);
- одноэтажных надземных (при хранении автомобилей в обособленных боксах, не имеющих непосредственного выезда наружу, при количестве боксов более пяти);
- надземных высотой два этажа и более, за исключением гаражей-стоянок боксового типа, с непосредственным выездом наружу;
- встроенных в здания другого назначения высотой два этажа и более;
- механизированных;
- для автомобилей, перевозящих ГСМ.

К открытому типу согласно СН 3.02.03-2019 относятся гаражи-стоянки без стенового ограждения или с частичным ограждением, площадь открытых проемов которых в наружных стеновых ограждениях по каждой длинной стороне либо одной длинной и двух торцевых сторон гаража-стоянки составляет не менее 50 % площади ограждающих конструкций каждого яруса. Таким образом, данные типы гаражей-стоянок закрытых объемов не имеют, напрямую сообщаясь через проемы с окружающей средой. В таких сооружениях существует высокая вероятность возникновения локального пожара с быстрым линейным развитием за счет активного притока воздуха и порывов ветра.

Несмотря на оборудование автоматическими установками пожаротушения, для всех зданий регламентируется огнестойкость строительных конструкций исходя из наихудшего сценария развития событий, а именно ситуаций, при которых данные установки не сработают и воздействие огня на строительные конструкции не будет ограничено. Для строительных конструкций нормируемые пределы огнестойкости устанавливаются при испытаниях при стандартных условиях теплового воздействия<sup>4, 5</sup>. При этом образец конструкции проектного размера помещается в специальную печь, в которой создан стандартный температурный режим. Там образец подвергается тепловому воздействию согласно ГОСТ 30247.0-94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования»<sup>6</sup>, в ходе которого система измерения и регистрации параметров фиксирует время и условия, при которых наступает одно или последовательно несколько предельных состояний по огнестойкости (несущая способность, целостность, теплоизолирующая способность), с учетом функционального назначения конструкции. Такое испытание проводят для двух образцов, после чего определяют предел огнестойкости конструкции (в минутах) как среднее арифметическое результатов их испытаний. Правильно подобранные значения позволят зданию и его конструкциям противостоять температурному воздействию достаточное количество времени, за которое люди успеют покинуть опасную зону.

<sup>3</sup> См. сноску 2.

<sup>4</sup> Межгосударственный стандарт. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования: ГОСТ 30247.0-94. – Введ. 01.01.96. – Переизд. 2003. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 11 с.

<sup>5</sup> Межгосударственный стандарт. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции: ГОСТ 30247.1-94. – Введ. 01.01.96. – М.: ИПК Изд-во стандартов, 1995. – 11 с.

<sup>6</sup> См. сноску 4.

В настоящей работе рассматриваются только открытые паркинги ввиду сложности их противопожарной защиты с помощью автоматических установок пожаротушения. В большинстве случаев сооружения гаражей-стоянок находятся в непосредственной близости от жилых комплексов, торгово-развлекательных и бизнес-центров, культурных учреждений и т.д. [4–6]. Такое расположение диктуется функциональным назначением гаражей-стоянок, т.к. массовое хранение автомобилей целесообразно осуществлять поблизости от мест пребывания людей. Кроме того, такое расположение требует решения дополнительных задач по обеспечению безопасности примыкающих объектов.

**Примеры резонансных пожаров в гаражах-стоянках.** Анализ 12 наиболее резонансных пожаров легковых автомобилей<sup>7</sup> показал, что большая часть из них (8) произошли в подземных паркингах, однако количество уничтоженных автомобилей составило при этом не более 10 единиц (24.11.2020, Иерусалим, Израиль), а наиболее опасным фактором пожара стало сильное задымление, о чем свидетельствует большое количество эвакуированных (07.04.2019, Россия, Москва – около 400 эвакуированных).

Четыре пожара произошли в наземных автостоянках, при этом количество уничтоженных автомобилей исчислялось десятками и сотнями (03.01.2017, Благовещенск, Россия, площадь горения 600 м<sup>2</sup>, уничтожены 56 легковых автомобилей; 01.01.2018, Ливерпуль, Великобритания, уничтожено около 1400 легковых автомобилей; 17.09.2018, Нью-Йорк, США, уничтожены 137 легковых автомобилей). Это говорит о том, что открытые автостоянки характеризуются неконтролируемым распространением пожара, вызванным выделяющейся при горении автомобиля теплотой.

<sup>7</sup> 1. Видео: более 50 машин сгорело на парковке в Благовещенске [Электронный ресурс] // Новости РЕН ТВ. – 2017. – 4 янв. – Режим доступа: <https://ren.tv/news/v-rossii/154731>. – Дата доступа: 02.10.2023.

2. В Ливерпуле на паркинге сгорело 1400 автомобилей [Электронный ресурс] // Автоновости КОЛЕСА.ру. – 2018. – 3 янв. – Режим доступа: <https://www.kolesa.ru/news/v-liverpule-na-parkinge-sgorelo-1400-avtomobilej>. – Дата доступа: 02.10.2023.

3. Масштабный пожар на парковке в Нью-Йорке: более 20 пострадавших [Электронный ресурс] // Sputnik Беларусь. – 2018. – 17 сент. – Режим доступа: <https://sputnik.by/20180917/Masshtabnyu-pozhar-na-parkovke-v-Nyu-Yorke-bolee-20-postradavshikh-1037691133.html>. – Дата доступа: 02.10.2023.

4. Пожарные тушили подземный паркинг на Галстяна [Электронный ресурс] // Новости Санкт-Петербурга и Ленинградской области: МК.RU. – 2018. – 15 нояб. – Режим доступа: <https://spb.mk.ru/incident/2018/11/15/pozharnye-tushili-podzemnyu-parking-na-galstyana.html>. – Дата доступа: 02.10.2023.

5. Из-за пожара на подземной парковке в Москве эвакуировали более 400 человек [Электронный ресурс] // Новости: Meduza. – 2019. – 7 апр. – Режим доступа: <https://meduza.io/news/2019/04/07/iz-za-pozhara-na-podzemnoy-parkovke-v-moskve-evakuirovali-bolee-400-chelovek>. – Дата доступа: 02.10.2023.

6. В подземном паркинге в 6-этажном доме в столице произошел пожар [Электронный ресурс] // Международное информационное агентство «Казинформ». – 2019. – 10 нояб. – Режим доступа: [https://www.inform.kz/ru/v-podzemnom-parkinge-v-6-etazhnom-dome-v-stolice-proizoshel-pozhar\\_a3583900](https://www.inform.kz/ru/v-podzemnom-parkinge-v-6-etazhnom-dome-v-stolice-proizoshel-pozhar_a3583900). – Дата доступа: 02.10.2023.

7. Пожар на подземной парковке в Иерусалиме. Фоторепортаж [Электронный ресурс] // Новости Израйля, Ближнего Востока и мира: NEWSru.co.il. – 2020. – 24 нояб. – Режим доступа: [https://www.newsru.co.il/photo/24nov2020/fire\\_parking.html](https://www.newsru.co.il/photo/24nov2020/fire_parking.html). – Дата доступа: 02.10.2023.

8. Пожар случился в паркинге ЖК в Нур-Султане [Электронный ресурс] // Главные новости Казахстана: Tengri News. – 2021. – 11 мая. – Режим доступа: <https://tengrinews.kz/incidents/pojar-sluchilsya-v-parkinge-jk-v-nur-sultane-436945/>. – Дата доступа: 02.10.2023.

9. В Петербурге под утро тушили пожар в паркинге дома на проспекте Большевиков [Электронный ресурс] // Новости Санкт-Петербурга: fontanka.ru. – 2021. – 10 июня. – Режим доступа: <https://www.fontanka.ru/2021/06/10/69961874/>. – Дата доступа: 02.10.2023.

10. Пожар на закрытом паркинге в Москве потушили [Электронный ресурс] // Известия. – 2022. – 31 янв. – Режим доступа: <https://iz.ru/1284391/2022-01-31/pozhar-na-zakrytom-parkinge-v-moskve-potushili>. – Дата доступа: 02.10.2023.

11. В Екатеринбурге сгорел автосервис с машинами внутри [Электронный ресурс] // Новости Екатеринбурга: E1.RU. – 2022. – 7 июня. – Режим доступа: <https://www.e1.ru/text/incidents/2022/06/07/71393678/>. – Дата доступа: 02.10.2023.

12. Ночной пожар уничтожил 3 машины на подземной парковке в Кемерове [Электронный ресурс] // Новости Кузбаса: NGS42.RU. – 2022. – 17 сент. – Режим доступа: <https://ngs42.ru/text/incidents/2022/09/17/71662154/>. – Дата доступа: 02.10.2023.

**Моделирование пожаров.** Ввиду большого разнообразия объемно-планировочных решений оценить динамику пожара при горении автомобиля достаточно сложно. Одним из наиболее перспективных методов является численное моделирование пожаров. Одной из наиболее доступных и распространенных программ для компьютерного моделирования пожаров является Fire Dynamics Simulator (FDS). Программа FDS была разработана в начале 2000-х гг. Национальным институтом стандартов и технологий (NIST) Министерства торговли США в сотрудничестве с Финским центром технических исследований [7]. В основу кода программного комплекса легли многолетние труды ученых в области динамики пожаров со всего мира. FDS широко используется в решении практических задач пожарной инженерии в области противопожарной защиты, а также в изучении научных основ динамики пожара и горения. Результаты моделирования используются во всем спектре задач обеспечения пожарной безопасности зданий, от проектирования огнестойкости и путей эвакуации до реконструкции пожаров при расследованиях.

Сущность работы FDS заключается в решении дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих пространственно-временное распределение температуры и скоростей газовой среды, концентраций компонентов газовой среды (кислорода, продуктов горения и т.д.), давлений и плотностей, что, по сути, представляет собой полевую модель [7]. Решение дифференциальных уравнений тепломассопереноса осуществляется методом конечных разностей. В качестве исходных данных пожарной нагрузки используются площадь ее размещения, геометрические размеры горящего помещения, количество, вес и теплота сгорания применяемых материалов.

Оценить количественные характеристики для моделирования пожаров автомобилей можно путем проведения лабораторных либо натуральных экспериментов.

В 2004 г. сотрудники Центра технических исследований Финляндии провели сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными [8]. Исследования включали как примеры локального возгорания, так и полномасштабный пожар в жилой комнате. Результаты моделирования и экспериментов оказались близки: практически совпали общий ход развития пожара, время достижения максимальной мощности тепловыделения и фазы затухания. Однако программа исследований не включала изучение пожаров легковых автомобилей.

В Роттердаме, Нидерланды, 1 октября 2007 г. на втором этаже встроенного паркинга жилого дома загорелся легковой автомобиль [9]. Пламя распространилось на припаркованные рядом автомобили, вследствие чего было уничтожено 6 и поврежден 1 автомобиль. Динамика представленного пожара была реконструирована с применением программы FDS. В результате расчетов было установлено, что фактическая температура на 20-й мин могла достичь 900 °С, что на 33 % выше по сравнению со стандартной температурной зависимостью с теоретическими значениями EN 1991-1-2:2002<sup>8</sup> (678 °С). Это свидетельствует о том, что использование нормативной зависимости стандартного пожара не всегда может соответствовать худшему сценарию и требует детального рассмотрения динамики пожара для такого типа объектов.

В 2009 г. сотрудники Института информатики Словацкой академии наук в исследовании [10] привели результаты компьютерного моделирования пожара в салоне автомобиля и его распространения на соседнее транспортное средство. Расчеты основывались на данных натурального эксперимента с использованием двух легковых автомобилей (рис. 1). Согласно результатам эксперимента при достижении температуры в салоне около 1000 °С за короткий промежуток времени произошло разрушение стекол: лобового стекла между 228-й и 244-й с, левого переднего стекла между 258-й и 266-й с и оставшихся задних

<sup>8</sup> EN 1991-1-2:2002. Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire – аналог действующих в Республике Беларусь ГОСТ 30247.0-94 и ГОСТ 30247.1-94 (см. сноски 4 и 5).

стекло на 10-й мин пожара. Впоследствии на 12-й мин пожара температура внутри салона увеличилась и достигла значения около 1100 °С. Резиновый уплотнитель ближайшего окна соседнего автомобиля загорелся на 7-й мин пожара.

Моделирование данного пожара в системе FDS (рис. 1) показало схожие данные. Критерием разрушения стекол в ходе моделирования выступала температура, при достижении которой стекла разрушались при натурном эксперименте. Температура разрушения стекол 900–1000 °С была достигнута: возле лобового стекла на 220-й с, возле левого переднего стекла на 247-й с. Пиковая температура в салоне достигла около 1100 °С также на 12-й мин пожара. На 375-й с произошло воспламенение резинового уплотнения окна соседнего автомобиля. На рисунке 2 приведено сопоставление результатов натурного эксперимента и моделирования. Сопоставление показало хорошую воспроизводимость результатов экспериментов средствами моделирования FDS. Однако такое моделирование потребовало очень высокой детализации расчетной сетки, что требует значительных ресурсов на проведение расчетов и вряд ли может быть воспроизведено на обычном персональном компьютере.

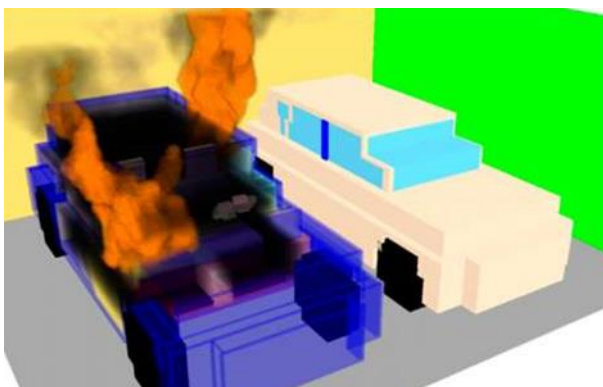
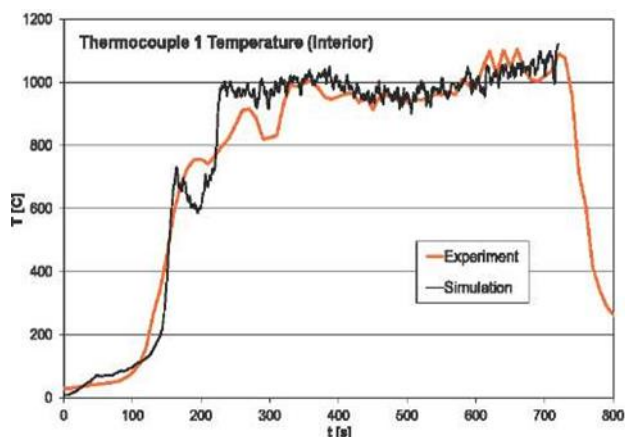
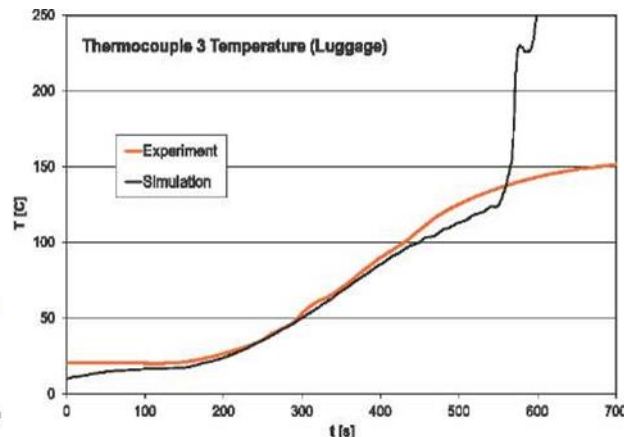


Рисунок 1. – Компьютерное моделирование пожара в программе FDS и его воспроизведение в реальных условиях



а) данные с датчиков, установленных в салоне автомобилей



б) данные с датчиков, установленных в багажниках автомобилей

Рисунок 2. – Сопоставление данных различных температур в ходе натурного эксперимента (оранжевая линия) и компьютерного моделирования (черная линия)

Для получения исходных данных для моделирования пожаров легковых автомобилей подробно изучаются реальные пожары и широко используются натурные эксперименты, в ходе которых легковые автомобили сжигаются с использованием крупномасштабного калориметра<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> Калориметр – прибор для измерения количества теплоты, выделяющейся или поглощающейся в каком-либо физическом, химическом или биологическом процессе.

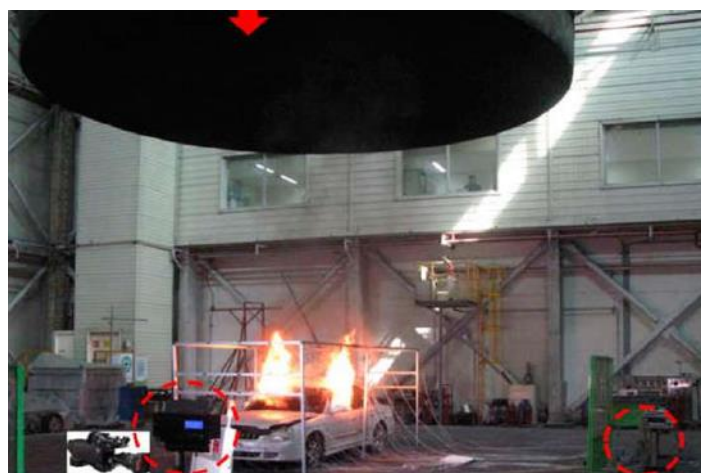
В 2016 г. сотрудники Национального исследовательского совета Канады провели полномасштабные огневые испытания гибридных автомобилей и электромобилей с разной степенью заряда батарей, а также автомобилей с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) (все автомобили 2012–2013 годов выпуска). Ход проведения и результаты испытаний были опубликованы в статье [11] и представлены в таблице 1.

**Таблица 1. Данные о выделении тепла для каждого транспортного средства**

Транспортное средство	Пиковая мощность тепловыделения (МВт)	Время достижения пиковой мощности (мин)	Общее количество выделенного тепла (МДж)	Потеря массы (кг)	Потеря массы (%)	Эффективная теплота сгорания (МДж/кг)
Автомобиль с ДВС 1	7,1	6,0	3290	274	25	12
Электромобиль 1 с зарядом 100 %	6,0	7,0	данные не получены	333	23	данные не получены
Электромобиль 2 с зарядом 85 %	5,9	5,8	4910	295	20	17
Автомобиль с ДВС 2	10,8	8,0	4950	336	25	15
Электромобиль 3 с зарядом 100 %	6,9	10,2	4660	363	22	13
Гибрид 1 с зарядом 85 %	6,0	7,5	4630	308	21	15
Гибрид 2 с зарядом 100 %	7,9	8,3	5850	445	26	13

В 2017 г. были опубликованы результаты исследований сотрудников Китайского университета горного дела и технологий [12], которые также провели натурный эксперимент с возгоранием легковых автомобилей, исследуя характер распространения огня и температуры, возникающие внутри автомобиля в ходе развития пожара. Проведенные эксперименты показали, что максимальная температура в салоне достигала значений 898–1021 °С.

В 2019 г. работники школы машиностроения южнокорейского университета Чун-Анг в Сеуле провели эксперименты для одного и двух легковых автомобилей с ДВС 1998 года выпуска с использованием крупномасштабного калориметра (рис. 3, 4) [13].



**Рисунок 3. – Общий вид калориметрической установки**



Рисунок 4. – Расположение и количество термопар: в салоне автомобиля, в моторном отсеке, на бамперах и топливном баке

Это дало возможность получить некоторые фактические значения параметров пожара с привязкой к горению реальных транспортных средств. В работе представлены следующие результаты экспериментов и их анализа:

– при пожаре двух автомобилей огонь перекинулся на соседний автомобиль примерно через 500 с (8 мин 20 с);

– максимальные мощности тепловыделения одного и двух транспортных средств были равны 3,5 и 6 МВт и достигнуты примерно за 1540 с (25 мин 40 с) и 1160 с (19 мин 20 с) соответственно (рис. 5). Эти значения оказались несколько меньше зафиксированных в предыдущих экспериментах.

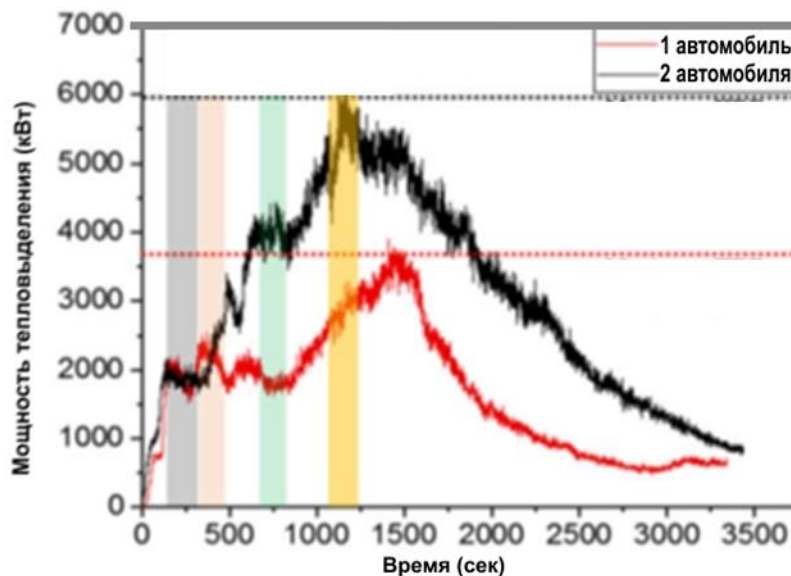
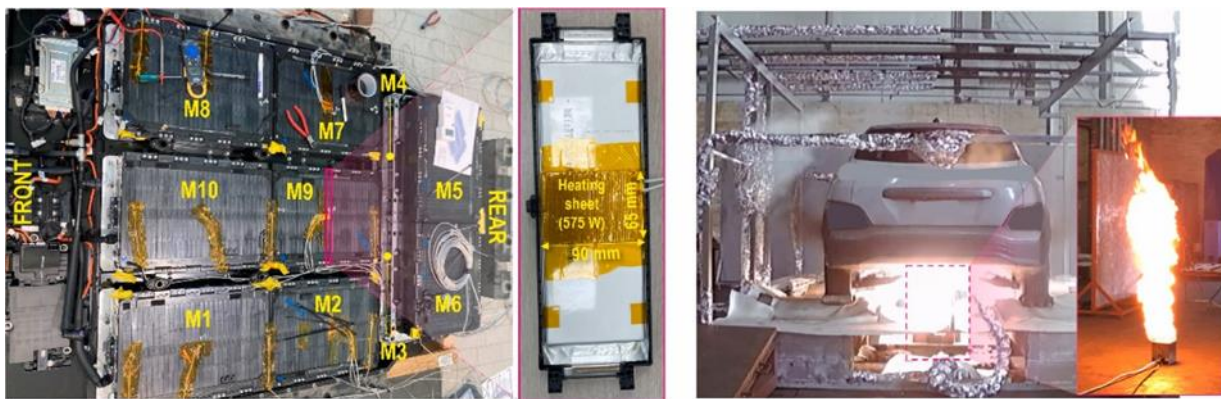


Рисунок 5. – Мощность тепловыделения одного и двух автомобилей с ДВС в зависимости от времени

В 2022 г. работники университета Донгкук (Корея) вместе с работниками Ольстерского университета (Великобритания) провели похожие эксперименты, но на этот раз сделав акцент на гибридных автомобилях и электромобилях [14]. Также для сравнения были дополнительно протестированы автомобили с двигателем внутреннего сгорания и электромобили на водородных топливных элементах.

Для эксперимента была разработана схема испытаний калориметрической системой мощностью 10 МВт (рис. 6). Внутри блоков литий-ионных аккумуляторов были дополнительно установлены термопары для наблюдения за распространением тепла между внутренними модулями аккумуляторов (рис. 7).





а) нагрев батарей с помощью нагревательных листов (обозначены как M1–M10)      б) внешний нагрев батарей с помощью горелки

Рисунок 6. – Общий вид установки

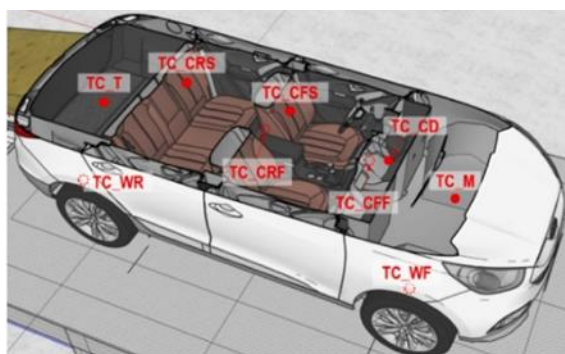


Рисунок 7. Расположение термопар

Результаты экспериментов показали, что пожары электромобилей продолжались до 70 мин. Их пиковые мощности тепловыделения составили диапазон от 6,51 до 7,25 МВт, что немного ниже, чем у автомобилей с ДВС в том же эксперименте (7,66 МВт) (рис. 8). Общее тепловыделение при пожарах электромобилей составило диапазон от 8,45 до 9,03 ГДж, что выше, чем у автомобилей с ДВС (8,08 ГДж).

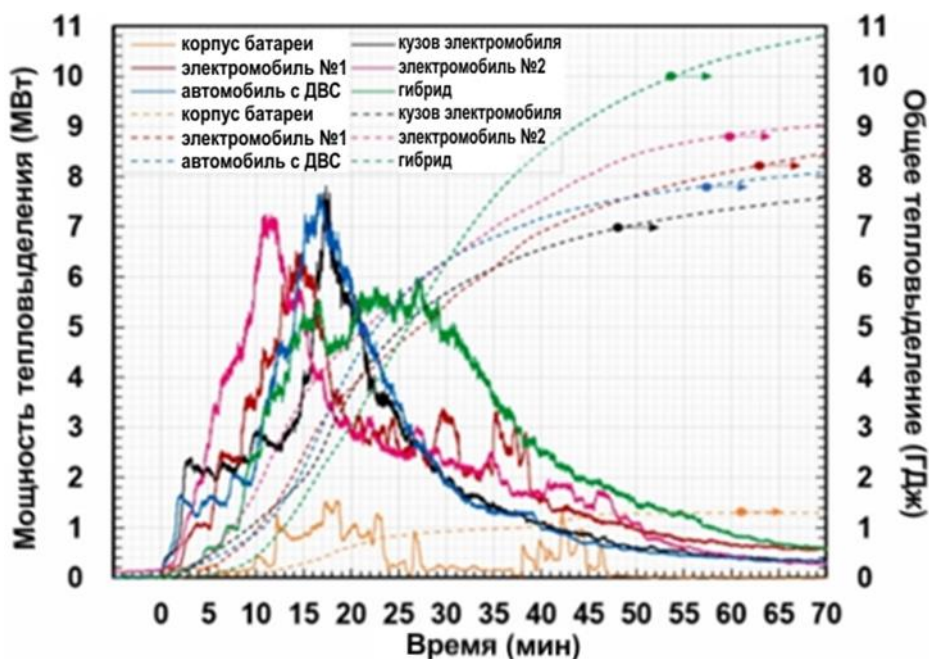


Рисунок 8. – Мощность тепловыделения при пожарах автомобилей с ДВС, электромобилей и гибридных автомобилей в зависимости от времени

Таким образом, при моделировании пожаров автомобилей средствами FDS можно использовать следующие факты:

– при пожарах легковых автомобилей с ДВС максимальная мощность тепловыделения может иметь значения в диапазоне 3,5–7,7 МВт (в отдельных случаях – достигать почти 11 МВт), при пожарах электромобилей максимальная мощность тепловыделения имеет значения в диапазоне 5,9–7,3 МВт, что несколько ниже, чем у автомобилей с ДВС. При известных значениях площади возгорания данный параметр в усредненном виде может быть использован при моделировании в программной среде FDS в свойствах горящей поверхности как индивидуальное значение удельного тепловыделения. Время достижения этой мощности может варьироваться от 8 (для более новых автомобилей) до 25 мин (для автомобилей более ранних годов выпуска), что также может задаваться вручную при моделировании в программе FDS;

– среднее значение теплоты сгорания автомобиля составляет 15 МДж/кг, что может быть использовано при моделировании в FDS при редактировании свойств реакции горения;

– температуры при пожарах современных легковых автомобилей внутри салона могут достигать значений около 1100 °С, что также можно вносить в программу FDS как критическую температуру пламени при редактировании свойств реакции горения;

– при пожаре легкового автомобиля, расположенного в непосредственной близости от другого, распространение пламени на соседний автомобиль происходит по времени за 8–10 мин с момента возникновения пожара. Данный факт можно использовать при моделировании в программе FDS как параметр элемента управления, с помощью которого имитируется распространение пожара в соответствии с данными натурных экспериментов. Данная информация актуальна для паркингов с большим количеством рядом расположенных автомобилей при расчете свободного времени развития пожара и количества автомобилей, которые могут загореться до прибытия подразделений МЧС и введения первых стволов на тушение.

Важным фактором при проведении моделирования будет являться высота горящего объекта, которую в соответствии с габаритами среднестатистического легкового автомобиля целесообразно принять равной 1,5 м.

### **Заключение**

Высокотемпературные режимы, характерные для пожаров современных легковых автомобилей в гаражах-стоянках, отрицательно влияют на несущую способность строительных конструкций данных сооружений, что вместе с токсичностью продуктов горения представляет высокую опасность для людей. Это требует оценки параметров горения и их воздействия на конструкции. С помощью анализа реальных пожаров и сопоставления их параметров с данными, полученными в ходе проведения натурных экспериментов, были сформулированы расчетные параметры горения для моделирования в программе FDS, которая на данный момент является одной из наиболее широко используемых для решения задач, связанных с пожарной безопасностью. Полученные данные говорят о том, что при пожарах легковых автомобилей распространение огня на соседний автомобиль происходит за 8–10 мин, максимальная мощность тепловыделения может составлять 10,8 МВт при времени достижения от 8 (при пожаре одного автомобиля) до 25 мин (при одновременном пожаре двух автомобилей), средняя теплота сгорания автомобиля составляет 15 МДж/кг, а температуры могут достигать 1100 °С. Моделирование пожаров легковых автомобилей при использовании полученных параметров поможет дать актуальную оценку воздействия на строительные конструкции, что позволит повысить уровень пожарной безопасности гаражей-стоянок.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ahrens, M. Vehicle Fires / M. Ahrens. – USA: National Fire Protection Association (NFPA), 2020. – 13 p.
2. Пасовец, В.Н. Пожары на автотранспортных средствах: причины возникновения / В.Н. Пасовец, В.А. Ковтун, Ш.Ш. Тагиев // Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси. – 2022. – Т. 6, № 2. – С. 228–238. – DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-2.228. – EDN: MHWDFL.
3. Исхаков, Х.И. Пожарная безопасность автомобиля / Х.И. Исхаков, А.В. Пахомов, Я.Н. Каминский. – М.: Транспорт, 1987. – 87 с.
4. Серебров, Б.Ф. Многоэтажные гаражи и автостоянки: учебное пособие / Б.Ф. Серебров. – Новосибирск: НГАХА, 2005. – 131 с.
5. Yurkevich, P. Podzemni parkoviště v Moskvě [Elektronický zdroj] / P. Yurkevich // Tunel. – 1999. – 8 Ročník, č. 1/99. – S. 28–33. – Režim přístupu: [https://www.ita-aites.cz/files/tunel/1999/tunel\\_99\\_01.pdf](https://www.ita-aites.cz/files/tunel/1999/tunel_99_01.pdf). – Datum přístupu: 02.10.2023 (Юркевич П.Б. «Подземная автостоянка на Площади Революции в Москве. От технического предложения до реализации проекта» – русская версия доступна на [https://yurkevich.ru/pdf\\_publications/Rs\\_ru.pdf](https://yurkevich.ru/pdf_publications/Rs_ru.pdf)).
6. Туркин, И.В. Надземный многоярусный паркинг. Использование передового американского опыта для строительства паркингов в России / И.В. Туркин // Вестник. Зодчий. 21 век. – 2013. – № 2 (47). – С. 82–87. – EDN: QNLKBX.
7. McGrattan, K. Fire Dynamics Simulator. Technical reference guide. Volume 1. Mathematical model: NIST Special Publication 1018, 6th ed. / K. McGrattan, R. McDermott, C. Weinschenk, K. Overholt, S. Hostikka, J. Floyd. – Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2013. – 116 p. – DOI: 10.6028/NIST.sp.1018.
8. Hietaniemi, J. FDS simulation of fire spread – comparison of model results with experimental data / J. Hietaniemi, S. Hostikka, J. Vaari. – VTT Technical Research Centre of Finland, 2004. – 54 p.
9. Van Acker, A. Fire case parking Lloydstraat, Rotterdam Retrospective view, new insights and outlook / A. Van Acker // Structural behaviour of prestressed concrete hollow core floors exposed to fire / W. Jansze, A. van Acker, et al. – BIBM, 2014. – Chapter 5. – P. 123–160.
10. Weisenpacher, P. Automobile interior fire and its spread to an adjacent vehicle: parallel simulation / P. Weisenpacher, J. Glasa, L. Halada // Journal of Fire Sciences. – 2016. – Vol. 34, No. 4. – P. 305–322. – DOI: 10.1177/0734904116647972.
11. Lam, C. Full-scale fire testing of electric and internal combustion engine vehicles / C. Lam, D. MacNeil, R. Kroeker, G. Lougheed, G. Lalime // Proc. 4th International Conference on Fires in Vehicles, Baltimore, USA, October 5-6, 2016. – Borås: Technical Research Institute of Sweden, 2016. – Pp. 95–106. – Url: <https://www.ri.se/en/five/publications>.
12. Jiang, X. Full-scale experimental study of fire spread behavior of cars / X. Jiang [et al.] // Procedia Engineering. – 2018. – Vol. 211. – P. 297–305. – DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.016.
13. Park, Y. Experimental study on the fire-spreading characteristics and heat release rates of burning vehicles using a large-scale calorimeter / Y. Park, J. Ryu, H.S. Ryou // Energies. – 2019. – Vol. 12, No. 8. – Pp. 1465–1476. – DOI: 10.3390/en12081465.
14. Sungwook, K. Full-scale fire testing of battery electric vehicles / K. Sungwook, M. Kwon, J. Yoon Choi, S. Choi // Applied Energy. – 2021. – Vol. 332. – Article 120497. – 17 p. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.120497.

**Оценка расчетных параметров горения, необходимых для моделирования пожаров легковых автомобилей в программной среде FDS**

**Estimation of calculated combustion parameters required for modeling of passenger car fires in the FDS software environment**

***Кудряшов Вадим Александрович***

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра пожарной безопасности, профессор

Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, Беларусь, г. Минск

Email: vatkud@gmail.com

SPIN-код: 1417-4096

***Vadim A. Kudryashov***

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Fire Safety, Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Belarus, Minsk

Email: vatkud@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4889-1060

***Иванов Станислав Владимирович***

Филиал «Институт профессионального образования» государственного учреждения образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра оперативно-тактической деятельности и техники, преподаватель

Адрес: пр-т Речицкий, 35А, 246023, Беларусь, г. Гомель

Email: istanislav400@gmail.com

***Stanislav V. Ivanov***

Branch «Institute of Vocational Education» of the State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Operational-Tactical Activity and Technical Equipment, Lecturer

Address: ave. Rechitskiy, 35A, 246023, Belarus, Gomel

Email: istanislav400@gmail.com

ORCID: 0009-0008-9995-8388

***Кобяк Валерий Викторович***

кандидат технических наук, доцент

Государственное учреждение образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь», кафедра ликвидации чрезвычайных ситуаций, доцент

Адрес: ул. Машиностроителей, 25, 220118, Беларусь, г. Минск

Email: valkobkii@gmail.com

***Valeriy V. Kobyak***

PhD in Technical Sciences, Associate Professor

State Educational Establishment «University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus», Chair of Emergency Elimination, Associate Professor

Address: Mashinostroiteley str., 25, 220118, Belarus, Minsk

Email: valkobkii@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5989-5465

## ESTIMATION OF CALCULATED COMBUSTION PARAMETERS REQUIRED FOR MODELING OF PASSENGER CAR FIRES IN THE FDS SOFTWARE ENVIRONMENT

**Kudryashov V.A., Ivanov S.V., Kobyak V.V.**

*Purpose.* On the basis of the analysis of real passenger car fires, full-scale experiments to determine the main design parameters of combustion for modeling passenger car fires and theoretical estimation of heat fluxes and slab temperatures at fire.

*Methods.* Comparison of parameters of real passenger car fires with full-scale experiments. Formulation of estimated combustion parameters for modeling in the FDS software environment.

*Findings.* Field experiments with the use of real passenger cars have shown: at fires of several passenger cars the flame spreading to the neighboring car takes place in 8–10 minutes from the moment of fire occurrence; the maximum power of heat release reaches 10.8 MW, and the time of reaching this power can vary from 8 (at fire of one car) to 25 minutes (at simultaneous fire of two cars). The average value of the heat of combustion of a car is 15 MJ/kg, and temperatures in such fires reach up to 1100 °C.

*Application field of research.* The obtained results can be used in modeling fires of passenger cars and assessing the impact on building structures, which will improve the level of fire safety of parking garages.

*Keywords:* fire resistance, parking garage, slab, passenger car, computer modeling, heat release capacity, combustion parameters, FDS.

(The date of submitting: October 5, 2023)

### REFERENCES

1. Ahrens M. Vehicle Fires. USA: National Fire Protection Association (NFPA), 2020. 13 p.
2. Pasovets V.N., Kovtun V.A., Tagiev Sh.Sh. Pozhary na avtotransportnykh sredstvakh: prichiny vozniknoveniya [Fire on vehicles: causes of their appearance]. *Journal of Civil Protection*, 2022. Vol. 6, No. 2. Pp. 228–238. (rus). DOI: 10.33408/2519-237X.2022.6-2.228. EDN: MHWDFL.
3. Iskhakov Kh.I., Pakhomov A.V., Kaminskiy Ya.N. *Pozharnaya bezopasnost' avtomobilya* [Fire safety of a vehicle]. Moscow: Transport, 1987. 87 p.
4. Serebrov B.F. *Mnogoetazhnye garazhi i avtostoyanki* [Multi-storey garages and parking lots]: tutorial. Novosibirsk State Academy of Architecture and Art, 2005. 131 p.
5. Yurkevich P. Underground parking-garage in the Revolution square in Moscow. From technical proposal to realization of the project. *Tunel*, 1999. Vol. 8, No. 1/99. Pp. 28–33. Available at: [https://www.ita-aites.cz/files/tunel/1999/tunel\\_99\\_01.pdf](https://www.ita-aites.cz/files/tunel/1999/tunel_99_01.pdf) (accessed: October 2, 2023). (cze). English version available at: [https://yurkevich.ru/pdf\\_publications/Rs\\_eng.pdf](https://yurkevich.ru/pdf_publications/Rs_eng.pdf)
6. Turkin I.V. Nadzemnyy mnogoyarusnyy parking. Ispol'zovanie peredovogo amerikanskogo opyta dlya stroitel'stva parkingov v Rossii [Aboveground multi-level parking lot. Use of the best American experience for construction of parking lots in Russia]. *Vestnik. Zodchiy. 21 vek*, 2013. No. 2 (47). Pp. 82–87. EDN: QNLKBX.
7. McGrattan K., Hostikka S., McDermott R., Floyd J., Weinschenk C., Overholt K. *Fire Dynamics Simulator. Technical reference guide. Volume 1. Mathematical model*: NIST Special Publication 1018, 6th ed. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2013. 149 p. DOI: 10.6028/nist.sp.1018e6.
8. Hietaniemi J., Hostikka S., Vaari J. *FDS simulation of fire spread – comparison of model results with experimental data*. VTT Technical Research Centre of Finland, 2004. 54 p.
9. Van Acker, J. Fire case parking Lloydstraat, Rotterdam Retrospective view, new insights and outlook. In book: Jansze W, Van Acker A., Della Bella B, Klein-Holte R., Linström G., Py J.-P., Scalliet M., Nitsch A., Benhöfer H. *Structural behaviour of prestressed concrete hollow core floors exposed to fire*. BIBM, 2014. Chapter 5. Pp. 123–160.
10. Weisenpacher P., Glasa J., Halada L. Automobile interior fire and its spread to an adjacent vehicle: parallel simulation. *Journal of Fire Sciences*, 2016. Vol. 34, No. 4. Pp. 305–322. DOI: 10.1177/0734904116647972.
11. Lam C., MacNeil D., Kroeker R., Lougheed G., Lalime G. Full-scale fire testing of electric and internal combustion engine vehicles. *Proc. 4th International Conference on Fires in Vehicles, Baltimore, USA*,

- October 5–6, 2016. Borås: Technical Research Institute of Sweden, 2016. Pp. 95–106. Url: <https://www.ri.se/en/five/publications>.
12. Jiang Xiao-Hui, Zhu Guo-Qing, Zhu Hui, Li Da-Yan. Full-scale experimental study of fire spread behavior of cars. *Procedia Engineering*, 2018. Vol. 211. Pp. 297–305. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.12.016.
  13. Park, Y. Experimental study on the fire-spreading characteristics and heat release rates of burning vehicles using a large-scale calorimeter / Y. Park, J. Ryu, H.S. Ryou // *Energies*. – 2019. – Vol. 12, No. 8. – Pp. 1465–1476. – DOI: 10.3390/en12081465.
  14. Sungwook K., Kwon M., Yoon Choi J., Choi S. Full-scale fire testing of battery electric vehicles. *Applied Energy*, 2021. Vol. 332. Article 120497. 17 p. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.120497.