ЛЪЧИСТ ТОПЛООБМЕН И РИСК ОТ РАЗПРОСТРАНЕНИЕ НА ПОЖАР ПРИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ ПРЕВОЗНИ СРЕДСТВА В ГАРАЖИ

д-р Теодоси Цанков, Академия на МВР, teodosi.kilifarski@abv.bg

РЕЗЮМЕ: *Изследването разглежда ролята на лъчистия топлообмен при пожари на електрически автомобили в подземни гаражи. Анализирани са механизмите, чрез които високата топлинна мощност и енергийната плътност на литиево-йонните батерии могат да предизвикат запалване на съседни превозни средства. Изчислено е времето за самозапалване на гуми и автомобилен интериор при топлинен поток 40 kW/m². Резултатите показват възможно запалване за 3–4 минути и висок риск от бързо разпространение на пожара в затворено пространство. Предложени са нормативни мерки за България, включително задължително проектиране на водни спринклерни и димни системи във всички подземни гаражи независимо от капацитета им.*

Ключови думи: *Електрически автомобил, подземни гаражи, лъчист топлообмен, пожар, литиево-йонни батерии, пожарна безопасност*

PROPAGATION AND INFLUENCE OF RADIANT HEAT TRANSFER IN ELECTRIC CAR FIRES IN UNDERGROUND GARAGES

Teodosi Tsankov, PhD, Academy of MoI, teodosi.kilifarski@abv.bg

ABSTRACT: *This study examines radiant heat transfer in electric vehicle fires in underground garages. It analyzes how the high heat release and energy density of lithium-ion batteries can ignite adjacent vehicles. The self-ignition time of tires and vehicle interiors is calculated for a radiant heat flux of 40 kW/m². The results indicate possible ignition within 3–4 minutes and a high risk of rapid fire spread in confined spaces. Regulatory measures are proposed for Bulgaria, including mandatory water sprinkler and smoke systems in all underground garages, regardless of capacity.*

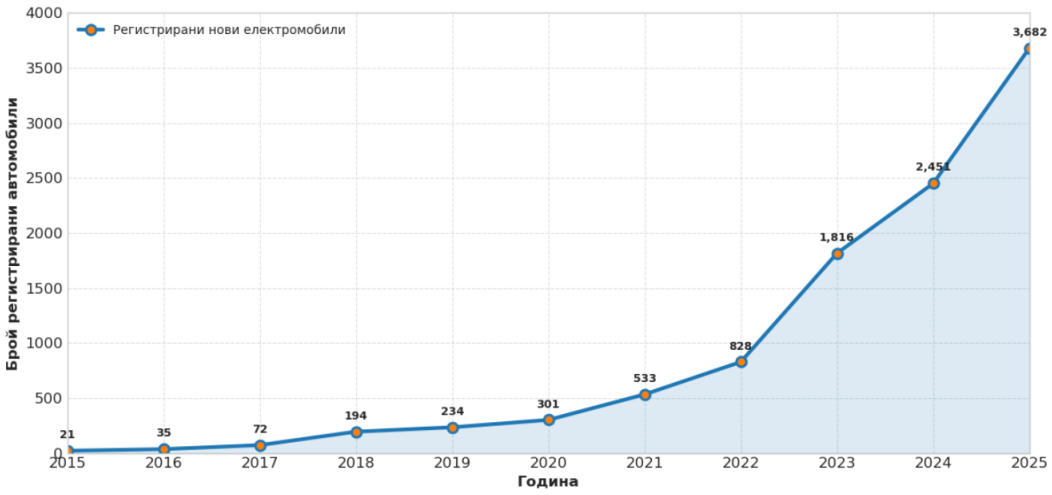
Keywords: *electric vehicles, underground car parks, radiant heat transfer, fire, lithium-ion batteries, fire safety*

1. Увод

През последното десетилетие електрическите автомобили (ЕА) се утвърдиха като основен елемент от устойчивия транспорт, но тяхното масово навлизане е свързано със специфични рискове, които значително се различават от тези при конвенционалните превозни средства. Броят на електрическите автомобили нараства и в България, като към 1 януари 2025 г. леките електрически автомобили са 17 826, което представлява увеличение с над 55% спрямо предходната година (Iliev, 2025).

Табл. 1. Темп и растеж на продажби на електрически автомобили (ACEA, 2025; Novinite, 2024; SeeNews, 2025; Trading Economics, n.d.)

Година	Нови електрически автомобили в BG	Спад/ растеж спрямо предходната	Коментар
2015	~21	–	Начални стъпки
2018	~194	+823 %	Ръст спрямо 2015
2023	~ 1 800	+55 %	Изключителен ръст
2024	2 451	+30.9 %	Ръст спрямо 2023
2025	3 682	+41.2 %	Изключителен ръст



Фиг. 1. Продажби на електрически автомобили в България по години

Пожарните събития при електрически превозни средства се отличават с интензивно отделяне на топлина, високи температурни стойности и генериране на токсични емисии. Специфичен риск представляват инцидентите в подземни паркинги, където ограничената вентилация и високата плътност на паркиране способстват за ескалация на горенето. В тези условия радиационният топлообмен е водещият механизъм за термодинамичен пренос. При термичен саморазпад (thermal runaway) на литиево-йонната акумулаторна батерия температурите надхвърлят 1000°C, при което се генерира критичен топлинен поток, способен да предизвика верижно възпламеняване на съседните обекти.

2. Особености и механизъм на радиационния топлообмен между автомобилите

Радиационният топлообмен при пожари на автомобили, особено в затворени пространства като подземни паркинги и гаражи, е основен фактор за тяхното бързо разпространение. Интензивната топлинна мощност, отделяна по време на горенето,

в комбинация с близкото разположение на автомобилите, създава условия за възникване на силно лъчисто излъчване, което представлява опасен източник на запалване на съседни превозни средства. Това обстоятелство налага да се отдели особено внимание на изследването на радиационния топлообмен при този тип пожари, тъй като той оказва съществено влияние върху динамиката на процеса и е критичен за предотвратяване на веригови реакции на горене.

Динамиката на пожара представлява процес на развитие във времето и пространството, като в затворени помещения топлинният баланс се определя основно от излъчването. При повишаване на температурата на горящите повърхности интензивността на лъчистото излъчване нараства в четвърта степен на абсолютната температура (съгласно закона на Стефан-Болцман), което води до рязко увеличаване на топлинния поток към околните обекти. Паралелно с излъчването на собствена енергия, всяко тяло поглъща лъчистата енергия, идваща от съседните горящи или нагрети повърхности, което ускорява термичното му натоварване и може да доведе до достигане на температура на запалване.

При пожари на открито процесът протича по различен начин, тъй като липсва натрупване на топлина в зоната на горене, а разпространението на пламъка и скоростта на изгаряне зависят преди всичко от вятъра и конвективните течения. В затворените пространства обаче, поради ограничената вентилация, се формира значителен топлинен резерв, който в съчетание с лъчистия топлообмен създава изключително агресивна среда за ескалация на пожара. Големината на зоната на горене и времето за разпространение на пламъците се определят от горимото натоварване, геометрията на пространството и формиращите се конвективни газови потоци, но радиационният топлообмен остава водещият механизъм за бързото прехвърляне на топлина между автомобилите. Топлообменът се осъществява в неограничена околна среда съгласно фиг. 2.



Фиг. 2. Топлообменът в неограничената околна среда (Tsankov, 2025)

Особеността на този вид топлообмен се състои в това, че дори кратковременното въздействие на интензивна лъчиста топлина може да предизвика запалване на близко разположени обекти с горими материали, като автомобили, дървени конструкции, бараки или елементи от сгради. В условията на паркинги и гаражи, където разстоянието между превозните средства е минимално, този механизъм придобива критично значение, тъй като дори няколко минути излагане на висока топлинна радиация могат да предизвикат запалване на съседен автомобил. Продължителното излъчване на топлина от горящ автомобил води до постепенно натрупване на енергия в околните обекти, което ускорява достигането на температури, опасни за възпламеняване.

Съгласно законите на радиационния топлообмен, количеството предадена топлинна енергия зависи от разликата между енергията, излъчвана от горещото тяло, и енергията, която другото тяло може да погълне. При горящ автомобил температурата на повърхността нараства значително, което увеличава интензитета на излъчване по закона на Стефан-Болцман, като излъчването се предава през въздуха към съседните обекти. Повърхностите на тези обекти абсорбират част от топлинната енергия и се загряват, а при продължително въздействие се достига температурата на възпламеняване на горимите детайли. Този процес обяснява механизма на т.нар. термично разпространение на пожари в пространства с висока плътност на автомобилите.

Допълнително, на механизма влияят фактори като емисивността на повърхностите, разстоянието между автомобилите, както и наличието на прегради, които могат да отразяват или поглъщат част от радиацията. В реални условия, особено в затворени паркинги, където отраженията от стени и тавани увеличават общия топлинен поток, рискът от разпространение на пожара чрез лъчение се повишава значително. Това налага при моделиране на пожари и при разработване на мерки за пожарна защита да се вземат предвид не само конвективните, но и радиационните процеси като основен елемент за прогнозиране на динамиката на огъня (фиг. 3) (Tsankov, 2025).



Фиг. 3. Разпространяване на пожара към съседен автомобил

3. Моделиране и оценка на времето за запалване на автомобили при интензивен радиационен топлинен поток

За да се оцени дали автомобил, намиращ се на 1 m от източник на пожар, може да се запали при лъчист топлинен поток 40 kW/m², се използват данните на Kang et al. (2023), според които при пожар на електрически автомобил измереният радиационен топлинен поток може да достигне 40–60 kW/m². За оценката следва да се приложат подходящи термодинамични зависимости и да се отчете температурата на възпламеняване на горимите материали в автомобила (например пластмаси, гуми и текстил).

Необходимо е да се знае температурата на възпламеняване на горими материали, които могат да съществуват в съседния автомобил, като:

- гуми: около 250°C – 300°C
- пластмаси: около 300°C – 350°C
- текстилни материали: около 200°C – 250°C (Grozdanov, 2017)

С оглед на излъчваната топлина от горящия автомобил (40 kW/m²), за да се разбере дали съседният автомобил ще се запали, трябва да се използва следната зависимост за топлинния поток (Antonov, 2023):

$$q = \sigma.\varepsilon.T^4 \qquad (1)$$

където:

- q е топлинният поток (40 kW/m²),
- σ е постоянната константа на Стефан-Болцман,
- ε е степента на чернота на обекта (за черен предмет ≈ 1),
- T е температурата на обекта в келвини.

След което трябва да се пресметне температурата T на обекта, като се използват данни за лъчистия топлинен поток и степента на чернота.

$$T = \left(\frac{q}{\sigma.\varepsilon} \right)^{1/4} \qquad (2)$$

Това ще ни даде температурата, до която ще се загрее съседният обект под въздействието на лъчистата топлина. Следователно:

$$T = \left(\frac{40000}{5.67x10^{-8}} \right)^{1/4} = 916.5 \text{ K} \approx 643.5°\text{C}$$

Това е значително по-висока температура от температурата на възпламеняване на повечето обичайни материали в автомобилите (като гуми, пластмаси и текстилни материали, които се запалват при около 250°C – 350°C). Следователно при лъчист топлинен поток от 40 kW/m² съседният автомобил ще бъде изложен на температура, значително по-висока от температурата на възпламеняване на горимите материали, което означава, че той ще се запали при тези условия след определено време.

Изчисляване на времето за самовъзпламеняване на съседните автомобили на разстояние 1 m. За да пресметнем времето, за което съседният автомобил ще се запали, можем да използваме принципа на топлинния поток и натрупването на топлина върху повърхността на горимите материали на автомобила. Ако се приеме,

че площта на гумите и интериора е около 2 m² (сумарно за гуми и интериор), специфичният топлинен капацитет на гумата и пластмасата е около 1,5 kJ/(kg·K), а масата на гумите и интериора на автомобила може да се определи като около 50 kg (за всички гуми и вътрешни материали), то натрупаната енергия ще се използва за увеличаване на температурата на материала и ще се изчисли времето за възпламеняване на гумите и интериора (Grozdanov, 2017).

Първо, изчислява се енергията, необходима за увеличаване на температурата (Loitsyansky, 2003):

$$Q_{necessary} = m.c.\Delta T \quad (3)$$

- m е масата на материала (50 kg),
- c е специфичният топлинен капацитет (1,5 kJ/(kg·K)),
- ΔT е разликата в температурата между началната температура и температурата на възпламеняване (за гумите около 250°C, за интериора около 300°C).

След това ще използва зависимостта за натрупване на топлинен поток, за да определи времето:

$$Q=q.A.t \quad (4)$$

където:
- q е топлинният поток (40 kW/m²),
- A е площта на обекта (2 m²),
- t е времето в секунди.

След пресмятане на горепосочените формули (4 и5) резултатите показват, че:

- гумите на автомобила ще се запалят след около 3,51 минути при изложение на топлинен поток от 40 kW/m².

- интериорът на автомобила ще се запали след около 4.29 минути при същия топлинен поток.

Тези времена са много кратки, което показва колко бързо може да се разпространи пожар в близост до горящ автомобил, ако топлинното въздействие е достатъчно интензивно. За сравнение, Grozdanov et al. (2017) установяват, че при пожар на автомобил с ДВГ условия за запалване на съседен автомобил, разположен на 0,8 m, възникват след приблизително 6–8 min. Това време е около два пъти по-дълго от изчисленото по-горе за разглеждания сценарий с ЕПС, което показва по-бърза ескалация при приетия по-висок лъчист топлинен поток.

Разпространението на пожар в подземен гараж, включващо няколко автомобила, може да доведе не само до значителни материални щети, но и до сериозни увреждания на конструктивните елементи на сградата. Продължителното въздействие на високите температури върху стоманобетонните елементи води до загуба на носеща способност поради намаляване на якостта на бетона и нарушаване на сцеплението с армировката. В редица изследвания се подчертава, че при пожар в затворени гаражни пространства температурите могат да надхвърлят 800–1000 °C, което е критично за конструкцията (EN 1992-1-2, 2004; Hertz, 2003). Това създава предпоставка не само за разрушаване на отделни участъци, но и за прогресивен колапс на сградата, което представлява значим риск за живота и здравето на хората.

Заключение

Изследваните симулации демонстрират изключително критичен времеви прозорец от 3 до 4 минути за прехвърляне на пожара от едно ЕПС към съседно, особено в условията на подземен паркинг. Този факт налага спешна ревизия на съществуващите мерки за пожарна безопасност и преминаване към холистичен инженерен подход, специфичен за литиево-йонните батерии.

Предвид бързата еволюция на електрическата мобилност и високия риск от верижно запалване се налагат следните ключови мерки:

- промени в Наредба № Із-1971 от 29 октомври 2009 г. за строително-технически правила и норми за осигуряване на безопасност при пожар (Naredba No. Iz-1971, 2009) – задължително проектиране на водни спринклерни и димни системи за всички подземни гаражи, независимо от капацитета им;

- внедряване на автоматизиран мониторинг: необходимо е инсталирането на интелигентни системи за ранна детекция на газове (които се отделят преди термо бягството) и автоматизирани системи за локализирано охлаждане на батерийния пакет, а не само на зоната на пожара;

- допълнително обучение на пожарникари за работа с литиево-йонни батерии и методи за ограничаване на вторично възпламеняване.

Препоръки

Осъществяване на експериментални тестове в реални условия за оценка на ефективността на различни видове спринклерни системи. Също така проучването и разработването на нови методи за бързо охлаждане на батерии при пожар са ключов елемент за намаляване на риска от подобни инциденти. Симулации на динамиката на дима и токсичните газове в затворени пространства ще допринесат за оптимизиране на дизайна на сградите и инфраструктурата, като се предвиди ефективното отвеждане на дима и топлината по време на пожар.

Библиография

1. ACEA. (2025). New car registrations: -0.6% in May 2025 year-to-date; battery-electric 15.4% market share. European Automobile Manufacturers' Association. Available at: https://www.acea.auto/pc-registrations/new-car-registrations-0-6-in-may-2025-year-to-date-battery-electric-15-4-market-share/ (accessed 13 August 2026).

2. Antonov, S. I. (2023). Matematichesko modelirane na dinamikata i prenosa na lachista energia pri pozhari. Sofia: Aleksandra Bakiev. ISBN 978-954-92423-7-9. [Антонов, С. И. (2023). Математическо моделиране на динамиката и преноса на лъчиста енергия при пожари. София: Александра Бакиев.]

3. EN 1992-1-2. (2004). Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design. Brussels: European Committee for Standardization (CEN).

4. Grozdanov, K. Ts. (2017). Modelirane na pozhar pri avtoproizshestvie s tsel identifikatsia na sabitieto [Doctoral dissertation, Technical University of Sofia]. Sofia. Institutional record available at: https://konkursi-as.tu-sofia.bg/doks/SL/ns/2372/jury/607.pdf (accessed 13 August 2026). [Грозданов, К. Ц.

(2017). Моделиране на пожар при автопроизшествие с цел идентификация на събитието [дисертационен труд, Технически университет – София]. София.]

5. Grozdanov, K., Antonov, S., Terziev, A., Spasov, D., Karapetkov, S., & Antonov, I. (2017). Experimental study of a car fire: Result and analysis. In: Proceedings of the XXII Scientific Conference with International Participation FPEPM 2017. Volume II: Fluid Mechanics, Fluid Machines, Hydraulics and Pneumatics; Clothing and Textiles: Design and Technologies. Sozopol: Technical University of Sofia, pp. 22–28. ISSN 1314-5371 [in Bulgarian]. Available at: https://www.kiip.bg/documents/messages/e73ee0c-834f-7533-04a0-33c243e527dd.pdf (accessed 13 August 2026).

6. Hertz, K. D. (2003). Limits of spalling of fire-exposed concrete. Fire Safety Journal, 38(2), 103–116. https://doi.org/10.1016/S0379-7112(02)00051-6

7. Iliev, A. (2025). Elektromobilniyat avtopark na Bulgaria se razrastva s nad 55% prez 2024 g. Investor.bg. Available at: https://www.investor.bg/a/447-analizi/406914-elektromobilniyat-avtopark-na-balgariya-se-razrastva-s-nad-55-prez-2024-g (accessed 13 August 2026). [Илиев, А. (2025). Електромобилният автопарк на България се разраства с над 55% през 2024 г. Investor.bg.]

8. Kang, S., Kwon, M., Choi, J., & Choi, S. (2023). Full-scale fire testing of battery electric vehicles. Applied Energy, 332, Article 120497. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120497

9. Loitsyansky, L. G. (2003). Mekhanika zhidkosti i gaza (7th ed., rev.). Moscow: Drofa. ISBN 5-7107-6327-6. [Лойцянский, Л. Г. (2003). Механика жидкости и газа (7-е изд., испр.). Москва: Дрофа.]

10. Naredba No. Iz-1971 ot 29 oktomvri 2009 g. za stroitelno-tehnicheski pravila i normi za osiguryavane na bezopasnost pri pozhar. (2009). Darzhaven vestnik, No. 96/2009. Available at: https://lex.bg/laws/ldoc/2135653786 (accessed 13 August 2026). [Наредба № Із-1971 от 29 октомври 2009 г. за строително-технически правила и норми за осигуряване на безопасност при пожар. (2009). Държавен вестник, бр. 96/2009.]

11. Novinite. (2024). Bulgaria leads Europe in car market growth with 18.4% increase in 2024. Novinite. Available at: https://www.novinite.com/articles/229004/ (accessed 13 August 2026).

12. SeeNews. (2025). Energy of tomorrow: 100,000 electric vehicles in Bulgaria by 2030. SeeNews. Available at: https://seenews.com/news/energy-of-tomorrow-100-000-electric-vehicles-in-bulgaria-by-2030-1272872 (accessed 13 August 2026).

13. Trading Economics. (n.d.). Bulgaria electric car registrations. Trading Economics. Available at: https://tradingeconomics.com/bulgaria/electric-car-registrations (accessed 13 August 2026).

14. Tsankov, T. G. (2025). Pozharna bezopasnost pri eksploatatsia na elektroavtomobili v podzemni garazhi. Sofia: Teodosi Genchev Tsankov. ISBN 978-619-93275-0-0. [Цанков, Т. Г. (2025). Пожарна безопасност при експлоатация на електроавтомобили в подземни гаражи. София: Теодоси Генчев Цанков.]