

УДК 614.841.2

DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2023.7.2.57.70>

*Андрій ГАВРИЛЮК, кандидат технічних наук, доцент (ORCID:0000-0002-8727-9950),  
Львівський державний університет безпеки життєдіяльності*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ, ЯКІ ОПИСУЮТЬ ПРОЦЕСИ ГОРІННЯ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

*Кількість електромобілів приватного чи комерційного використання продовжує стрімко зростати. Збільшення чисельності таких транспортних засобів, як в абсолютному так і у відносному значеннях, призводить до збільшення різного роду небезпек. Однією з таких важливих небезпек є пожежі зазначених транспортних засобів.*

*Метою роботи є аналіз та особливості розвитку процесів горіння електромобілів, а також показників які ці процеси здатні описати.*

*Аналіз, взаємозв'язок та розуміння показників, які описують пожежі електромобілів, створить підґрунтя про особливості таких пожеж, а також передумови для ефективних методів боротьби з ними.*

*Результати статті можуть бути використанні при дослідженнях протипожежних відстаней між електромобілями та будівельними конструкціями, при визначенні необхідних ступенів вогнестійкості будівельних конструкцій заритих автопаркінгів та гаражів, врахуванням при проектування систем пожежної сигналізації та пожежогасіння, а також для забезпечення безпеки рятувальників відповідним захисним одягом та спорядженням при ліквідації пожеж такого роду.*

**Ключові слова:** пожежа електромобіля, літій-іонна батарея, пожежна небезпека електромобіля.

**Вступ та постановка проблеми.** Світовий автопарк налічує понад 1 мільярд одиниць і за прогнозами впродовж 50 років їх кількість зросте до 2,5 мільярдів [1]. Такі тенденції гостро окреслили питання екологічної безпеки, вирішення якої поклали на електромобілі. Сама ідея виникнення електромобілям бере свій початок у 1800-х роках [2].

Згідно із даними [3] кількість електромобілів, що були продані у 2021 році перевищили 10% світових продажів автомобілів. Разом з тим, загальна чисельність парку електромобілів, що використовується у світі, станом на кінець 2022 року, перевищує 27 млн (рис 1).

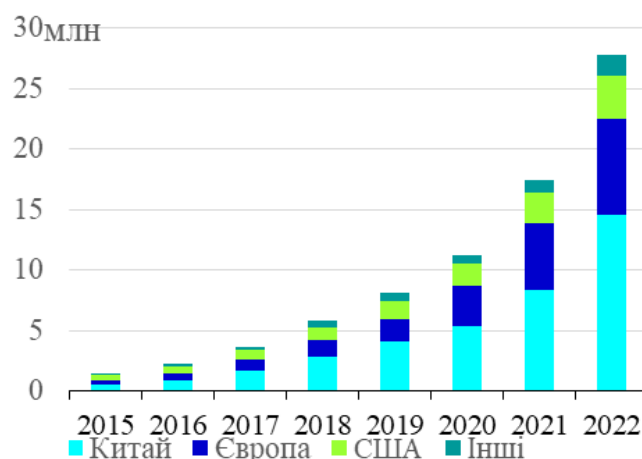


Рисунок 1. Динаміка кількості електромобілів у світі

Електро-хімічні реакції, які відбуваються у силовій акумуляторній батареї (далі — АКБ), за певних умов [4] здатні викликати незворотною екзотермічну реакцію, що часто стає причиною займання і призводить не лише до пожеж, але й вибухів електромобілів.

Пожежі та вибухи електромобілів [5-9] викликають серйозне занепокоєння у громадськості та створюють нові виклики для наукової спільноти.

Тому різнобічні дослідження пожеж та інших пожежонебезпечних ситуацій електромобілів є вкрай важливими. Нові розроблені та досліджені безпекові підходи створять підґрунтя для зменшення матеріальних збитків та людських жертв внаслідок таких пожеж.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Зважаючи на актуальність тематики і перспективи розвитку електромобілів не тільки в галузі автомобілебудування, але й в усьому напрямку інженерії, у світовій науковій спільноті присвячено немало наукових праць. У наукових працях [10-12] проведено всебічні дослідження силових АКБ електромобілів на їх термічну стабільність.

Пожежна небезпека силових батарей при їх надмірному заряджанні досліджено у наукових працях [13, 14]. Розглянуто та досліджено температурні параметри, які виникають при надмірному заряджанні силових батарей, а також їх здатність до займання.

Пожежонебезпечні режими роботи силових АКБ електромобілів внаслідок їх механічного пошкодження досліджено у [15, 16, 17]. У даних дослідження силові АКБ піддавались механічному пошкодженню різними предметами та у різний спосіб.

Автори роботи [18] дослідили різні типи силових батарей електромобілів та дали оцінку їх пожежній небезпеці. Встановлено, що силова АКБ може визначати рівень пожежної небезпеки електромобіля в цілому.

Повномасштабні вогневі випробування електромобілів наведено у науковій праці [19]. Дане дослідження акцентоване на визначення шкідливих газів, які виділяються в наслідок пожежі, а також на способах пожежогасіння електромобілів.

У автори роботи [20] провели моделювання пожежі електромобіля і вплив небезпечних факторів пожежі на будівлю паркінгу з використанням програмного комплексу Fire Dynamic Simulator. За результатом моделювання визначено, що мінімальна протипожежна відстань від електрозарядного пункту та електромобіля до стіни будівель різного функціонального призначення повинна становити не менше 3 м. Отримані дані щодо безпечної протипожежної відстані дозволять запобігти поширенню пожежі від електромобіля як по фасадній системі будівлі так і в середину приміщення через світлові прорізи.

У праці [21] за допомогою CFD моделювання було проведено дослідження щодо визначення кількості продуктів згоряння, а також тепла, яке виділяється внаслідок пожежі на закритому паркінгу. Джерело пожежі було змодельовано у вигляді розлитого палива розміром 3 м на 1,5 м і потужністю 5 МВт. Встановлено, що для забезпечення видимості у 15 м за закритому паркінгу під час пожежі потрібно забезпечити повітрообмін 300 тис м<sup>3</sup>/год зі швидкістю 1,1 м/с. Причому за наявності поздовжніх балок повітрообмін потрібно збільшити на 20 % у порівнянні із плоскою стелею.

Огляд протипожежного захисту електромобілів наведено у роботі [22]. Встановлено, що діючі норми щодо забезпечення системи протипожежного захисту електромобілів не відповідають умовам сьогодення і не забезпечують належного рівня захисту як пасажирів, так і транспортних засобів в цілому. Підвищення протипожежного захисту електромобілів та інших транспортних засобів, що використовують альтернативні джерела енергії можна досягти завдяки удосконаленню нормативно-правової бази, щодо норм обладнання зазначених об'єктів системами протипожежного захисту.

Як показує аналіз наукових праць, дослідженням показників, які комплексно описують та узагальнюють процеси горіння електромобілів приділена недостатня увага. Це дає підстави стверджувати на доцільності проведення дослідження такого роду.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Процеси горіння, як силових АКБ електромобілів так і електромобілів в цілому, описують ряд показників. До таких показників належать: температура горіння, тепловий потік, густина теплового потоку, сумарна енергія тепловиділення, коефіцієнт швидкості розвитку пожежі, питома теплота згоряння, горючі гази тощо.

Розуміння таких показників та їх параметрів, які описують пожежі електромобілів, створить підґрунтя для розуміння розвитку та небезпек таких пожеж, а також ефективних методів боротьби з ними. Проведемо аналіз кожного із зазначених показників.

**Температура горіння (°C)** — це температура до якої нагріваються продукти горіння в реальних умовах пожежі. На температуру горіння на сам перед впливає хімічна структура горючого.

При пожежі електромобілів температура продуктів згоряння може сягати 1500 °C [23]. Разом з тим під час повномасштабних випробувань, за даними [24] температура продуктів згоряння пожеж електромобілів становила в межах 900-1000 °C, а температура власне силових АКБ 800-900 °C.

Якщо розглянути дослідження власне літій-іонних батарей то за даними дослідників Голубков та інші [25] температура у момент виникнення незворотної екзотермічної реакції за кілька секунд збільшується від 220 °C (у момент виникнення незворотної екзотермічної реакції) до 700-750 °C.

**Сумарна енергія тепловиділення (Дж)** — це загальна кількість енергії, яка передана в процесі теплообміну впродовж процесу горіння (пожежі).

Кількість енергії, яка виділяється під час повномасштабного випробування електромобіля, з повністю зарядженою батареєю ємністю 64 кВт·год становить понад 9 ГДж і 8,5 ГДж для електромобіля, що обладнаний батареєю 39 кВт·год. Разом з тим цікавою особливістю ж те, при спалюванні аналогічної силовій АКБ виділялось близько 1,3 ГДж енергії і понад 7,5 ГДж від електромобіля, з якого дана батарея була витягнута. Тобто більший вклад у сумарну енергію тепловиділення створюється власне оздоблювальними матеріалами кузова, шинами тощо ніж самою силовою АКБ. [26].

Науковці Jonna Нунупен та інші [27] на підставі повномасштабних випробувань встановили, що для електромобілів обладнаних силовою АКБ ємністю 50 кВт·год з станом заряду 90%, електромобіля із АКБ 40 кВт·год з станом заряду 80%, та електромобіля з АКБ 24 кВт·год з станом заряду також 80% сумарна енергія тепловиділення складає 6,7 ГДж, 5,7 ГДж та 5,2 ГДж відповідно.

**Потужність теплового потоку (Вт)** — визначає кількість енергії, що проходить через ізотермічну поверхню за одиницю часу і спрямований у напрямку протилежному до градієнта температури [28]. Тепловий потік є похідною по часу від сумарної енергії тепловиділення.

Так як тепловий потік є похідною по часу від сумарної енергії тепловиділення, то загальна ситуація буде аналогічною як і для тепловиділення.

Силові АКБ ємністю 39 кВт·год створює тепловий потік 1,54 МВт, а електромобіль з якого демонтована силові АКБ — 7,53 МВт. Натомість аналогічний електромобіль обладнаний АКБ ємністю 39 кВт·год створює тепловий потік 9,51 МВт. Електромобіль обладнаний повністю зарядженою силовою АКБ ємністю 64 кВт·год 7,25 МВт [29].

Під час вогневого випробування електромобіля з силовою АКБ ємністю 80 кВт/год при 100% заряду батареї потужність теплового потоку складала понад 10 МВт [30]. Динаміка зміни потужності двох аналогічних транспортних засобів, один з яких обладнаний силовою АКБ інший ДВЗ приведено на рисунку 2.

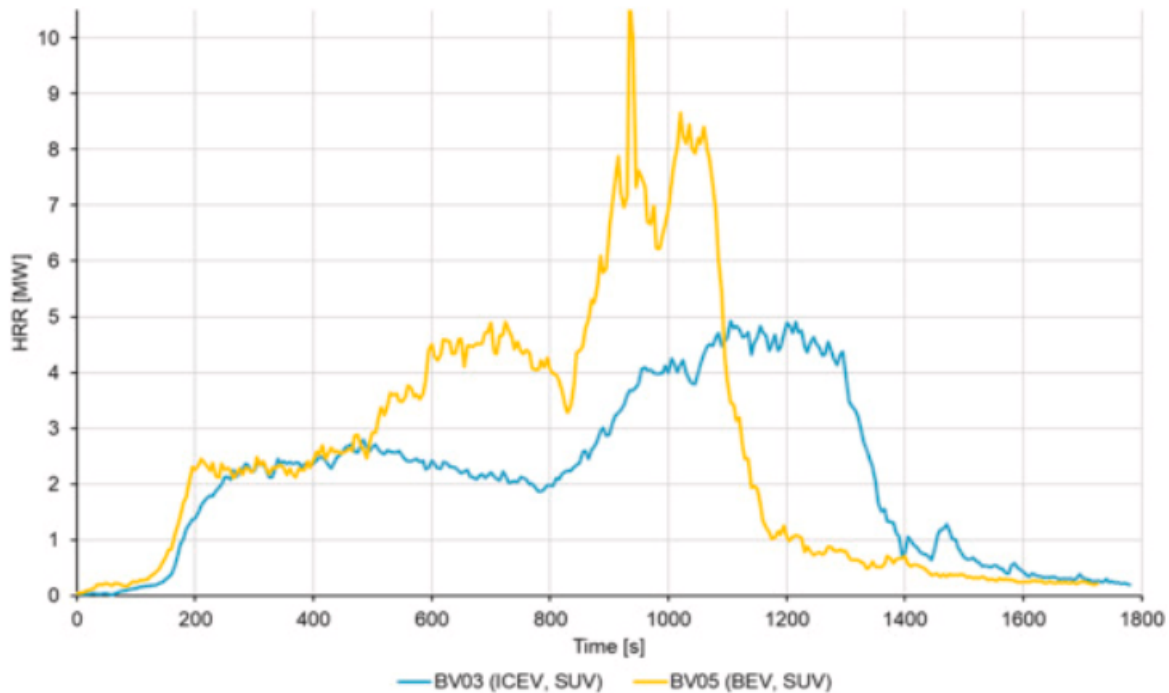


Рисунок 2. Динаміка зміни потужності теплового потоку під час пожежі електромобіля (жовта лінія) та автомобіля із ДВЗ (синя лінія) [30]

У роботі [31] провели повномасштабні вогневі випробування для електромобіля обладнаних силовою АКБ ємністю 40 кВт·год з станом заряду 80%. Значення потужності теплового потоку 7 МВт.

**Густина теплового потоку** (кВт/м<sup>2</sup>), — це кількість енергії, яка проходить через одиницю площі поверхні за одиницю часу [32].

Густина теплового потоку безпосередньо впливає на ступінь нагрівання суміжних предметів і їх подальше займання, тобто на поширення пожежі. Очевидно, що при однаковому тепловому потоці, але різній площі полум'я, тепловий потік буде різний. Загалом тепловий потік змінюється у часі та залежить від розвитку пожежі, повітряних потоків тощо. Тому густина теплового потоку дуже мінлива у часі. Пожежа електромобіля з повністю зарядженою силовою АКБ ємністю 39 кВт·год створювала густину теплового потоку 40-50 кВт/м<sup>2</sup>, а з силовою АКБ ємністю 64 кВт·год — 50-60 кВт/м<sup>2</sup>.

**Коефіцієнт швидкості розвитку пожежі** (Вт/с<sup>2</sup>) — характеризує відношення максимального значення теплового потоку до часу, за який дане значення досягнуте. Коефіцієнт швидкості розвитку пожежі є похідною по часу від теплового потоку, або другою похідною від сумарної енергії тепловиділення.

Залежність між потоком теплового випромінювання та коефіцієнтом швидкості розвитку пожежі наведено у формулі (1).

$$Q=\theta \cdot t^2 \quad (1)$$

Де Q – тепловий потік, МВт,  $\theta$  – коефіцієнт швидкості розвитку пожежі, МВт/с<sup>2</sup>, t – час, за який був досягнутий тепловий потік, с.

Загалом в залежності від коефіцієнту швидкості розвитку пожежі, усі пожежі поділяють на 4 види: повільні, середні, швидкі та надзвичайно швидкі. На це впливає час досягнення потоку теплового потоку у 1 МВт, що наведено у таблиці 1.

Таблиця 1. Класифікація пожеж за швидкістю розвитку [33]

Характеристика пожежі	Час досягнення потеплого потоку 1 МВт, с	Коефіцієнт швидкості розвитку пожежі, кВт/с <sup>2</sup>
Повільні	600	0,0028
Середні	300	0,0111
Швидкі	150	0,0444
Дуже швидкі	75	0,1778

За результатами експерименту для електромобіля, який був обладнаний силовою АКБ ємністю 39 кВт·год тепловий потік 1 МВт досягався за 183 секунди. Тобто коефіцієнт швидкості розвитку пожежі і першому випадку складав 0,03 кВт/с<sup>2</sup>, що відносить дану пожежу до швидких за швидкістю розвитку.

**Питома теплота згоряння** (Дж/кг) — кількість енергії, яка виділяється при повному згорянні 1 кг палива.

Питома теплота згоряння залежить від природи палива, що горить. Усереднену питому теплоту згоряння складають сотні найменувань речовин та матеріалів, які виконують різне функціональне чи оздоблювальне призначення в електромобілях. До них відносяться різні полімерні матеріали, гума, поліетилен, шкіра, пластик, каучук, поліпропілен, різні синтетичні матеріали тощо.

У таблиці 2. проаналізовано теплота згоряння для різних електромобілів.

Таблиця 2. Динаміка питомої теплоти згоряння певних електромобілів

№	Заряд силової АКБ, %	Рік виготовлення електромобіля	Маса електромобіля до випробування, кг	Маса електромобіля після випробування, кг	Втрата маси, кг	Питома теплота згоряння, МДж/кг	Джерело
1.	100	2014	1148	1115	23	18,2	[34]
2.	85	2014	1145	1180	20	16,6	[34]
3.	100	2014	1650	1287	22	12,8	[34]
4.	100	2020 (лише АКБ)	449	421	6,3	45,9	[35]
5.	100	2020	1540	1,256	18,4	29,8	[35]
6.	100	2020	1685	1,389	17,6	30,5	[35]

Варто відмітити, що у більш сучасних електромобілях питома теплота згоряння є більшою. Це пояснюється використанням більшою мірою синтетичних матеріалів, а також силовою АКБ більшої ємності.

**Горючі гази** — гази, які виділяються з силової АКБ внаслідок проходження екзотермічної реакції. Власне кількість і вид газів, які виділяються з подальшим горінням, формують розміри реактивного струменя полум'я.

Відсоткове об'ємне виділення (від об'єму АКБ) таких газів наведено у таблиці 3. Залежно від типу силової батареї, відсоткове відношення таких газів може змінюватись в незначних межах [36, 37].

Таблиця 3. Відсоткове об'ємне виділення газів від силової АКБ [36]

Вид газу	Відсоткове об'ємне виділення (від об'єму силової АКБ)
H <sub>2</sub>	30
CO	40
CO <sub>2</sub>	10
CH <sub>4</sub>	7
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	3
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1
Інші гази	9

Виділення водню та метану може формувати вибухонебезпечну концентрацію та призводити до вибуху.

Це гостро стосується закритих приміщень, коли електромобіль, приміром, перебуває у приватному гаражі.

Разом з тим особливу небезпеку створює фтористий водень (HF), який має дуже високу токсичність [38].

Найвищий показник утворення HF спостерігається при заряді батареї, як не дивно, у 50 %, а найменший показник для заряду 100 % [39]. Динаміка викиду HF від заряду батареї приведено на рисунку 3. Для дослідження використовувались літій-іонні батареї типу LFP, анод яких був виготовлений на основі фосфат літію заліза.

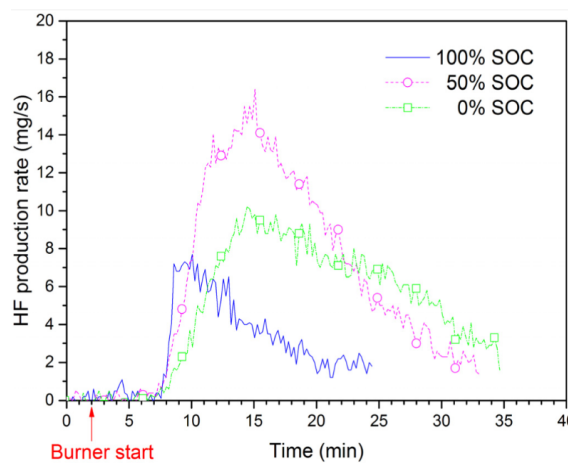


Рисунок 3 – Динаміка викиду HF від стану заряду АКБ [39].

Цікавим є той факт, що більший заряд батареї, генерує меншу кількість HF, і швидкість викиду даного газу є більшою при меншому відсотковому значенні заряду, що приведено у таблиці 4.

Таблиця 4. Викиди HF при різному значенні заряду батареї

Заряд (SOC, %)	Швидкість викиду	Загальна кількість HF, г	Питоме значення HF (мг/Вт·год)	
			За [40]	За [41]
100	8.3	5.6	50	37
50	16	14	120	39
0	10	11	100	69

Таким чином із міркувань кількості викиду фтористого водню батареї із меншим зарядом створюють більшу небезпеку ніж з більшим зарядом.

Науковці Larsson та інші [42] виявили залежність між видом HF та ємністю АКБ, яка лежить в межах 20-200 мг Вт<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>.

За даними джерела [43] кількість та різноманіття газів, які виділяються внаслідок незворотної екзотермічної реакції прямопропорційно залежать від стану заряду літій-іонної батареї. Дослідження проводились на літій-іонних батареях типу 18650, анод яких був виготовлений на основі LiCoO<sub>2</sub>, а катод на основі графіту.

У таблиці 5 наведено гази, які виділяються внаслідок незворотної екзотермічної реакції літій-іонних батарей типу 18650.

Таблиця 5. Склад газів, які виділяються внаслідок незворотної екзотермічної реакції літій-іонних батарей типу 18650

Заряд \ Газ	0 %	25 %	50 %	75 %	100 %
CO	+	+	+	+	+
CO <sub>2</sub>	+	+	+	+	+
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	-	+	+	+	+
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	-	+	+	+	+
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	-	+	+	+	+
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	-	+	+	+	+
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	-	+	+	+	+
C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	-	+	+	+	+
C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	-	+	+	+	+
C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	-	+	+	+	+
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub>	-	-	-	+	+
C <sub>6</sub> H <sub>10</sub>	-	-	-	+	+

Як помітно з таблиці 5, при відсутності заряду у літій-іонних батареях внаслідок нагрівання виділяються лише чадний та вуглекислий газ, які є негорючими, хоча чадний газ є отруйним. При збільшенні заряду до 25% гамма газів, які виділяються значно збільшується і практично не міняється при збільшенні заряду до 100%.

На рисунку 4 наведено динаміку зміни відсоткового відношення газів, від стану заряду літій-іонних батарей, які виділяються при незворотній екзотермічній реакції.

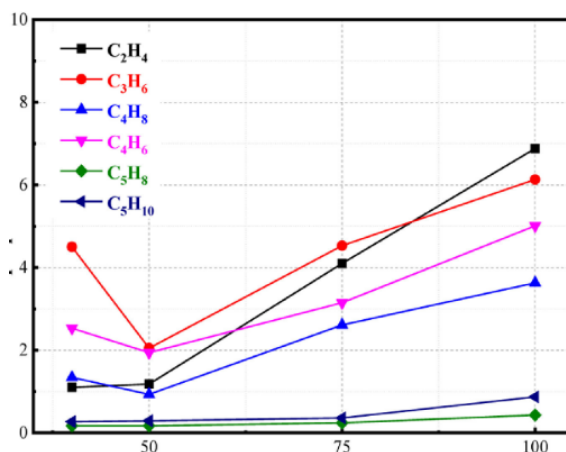


Рисунок 4 – Динаміка зміни відсоткового відношення газів, від стану заряду літій-іонних батарей, які виділяються при незворотній екзотермічній реакції

Найбільший відсотковий приріст газу від заряду літій-іонних батарей є у етилену. До 50 % заряду літій-іонних батарей його кількість становить близько 1%, і вже при досягненні 100 % заряду – понад 6 %.

**Тиск вибуху.** Газу, які виділяються внаслідок незворотної екзотермічної реакції, про що йшлося вище, можуть накопичуватись в замкнених об'ємах, формуючи вибухонебезпечні концентрації. Тому доцільно проаналізувати тиск вибуху, який може створюватись газами, що утворились від силових АКБ.

У дослідженні [44] використовувалося комерційне програмне забезпечення CFD FLACS [45] для моделювання газової дисперсії та вибуху суміші газів від літій-іонних батарей. На підставі дослідження встановлено, що тиск вибуху може становити від 1,35 кПа до 1,45 кПа.

У роботі [46] досліджено концентраційні межі вибуху газів, що виділяються в залежності від стану заряду. Дані дослідження наведено у таблиці 6.

Таблиця 6. Концентраційні межі вибуху газів, в залежності від стану заряду літій-іонних батарей [46]

Стан заряду, %	Нижня концентраційна межа вибуху, %	Верхня концентраційна межа вибуху, %
25 %	7,25	47,95
50 %	11,98	40,06
75 %	6,53	51,82
100 %	3,97	61,35

Як помітно із даних таблиці, найбільший діапазон вибухонебезпечності має суміш газів, які виділяються з літій-іонних батарей, що мають 100 % заряд. Це діапазон складає понад 57 %. Особливістю є те, що діапазон вибухонебезпечності газів для 25% заряджених батарей складає понад 40%, що є більше ніж для 50% заряджених батарей на 12 %.

#### **Висновки та перспективи подальших досліджень.**

Під час пожеж електромобілів температура продуктів згоряння може сягати до 1500 °С, а при горінні лише силової АКБ — 800-900 °С.

Сумарна енергія тепловиділення внаслідок горіння електромобілів залежить від ємності силової АКБ, ступеня її заряду становить для електромобіля, з повністю зарядженою батареєю ємністю 64 кВт·год понад 9 ГДж.

Під час пожеж електромобілів потужність теплового потоку також залежить від ємності і заряду силової АКБ і складає від 6 МВт для електромобіля з ємністю АКБ 39 кВт·год, при цьому густина теплового потоку становить в межах 40-50 кВт/м<sup>2</sup>.

За коефіцієнтом швидкості розвитку пожежі такі пожежі відносяться до швидких, з коефіцієнтом швидкості розвитку пожежі понад 0,0111 кВт/с<sup>2</sup>.

Питома теплота згоряння сучасних електромобілів складає понад 30,5 МДж/кг, що у понад як у 2 рази більше за горіння пилотеріалів.

Під час горіння силових АКБ відбувається виділення ряду газів серед яких водень та метан, які здатні формувати вибухонебезпечну концентрацію та призводити до вибуху, особливо в закритих приміщеннях, коли електромобіль, приміром, перебуває у приватному гаражі. Особливу небезпеку створює фтористий водень, який має дуже високу токсичність.

Під час викиду газів, при утворенні вибухонебезпечної концентрації, тиск вибуху може становити від 1,35 кПа до 1,45 кПа. Найбільший діапазон



вибухонебезпечності має суміш газів, які виділяються з літій-іонних батарей, що мають 100 % заряд.

Результати можуть дослідження можуть бути використанні при дослідженнях протипожежних відстаней між електромобілями та будівельними конструкціями, при визначенні необхідних ступенів вогнестійкості будівельних конструкцій заритих автопаркінгів та гаражів, врахуванням при проектування систем пожежної сигналізації та пожежогасіння, а також для забезпечення безпеки рятувальників відповідним захисним одягом та спорядженням при ліквідації пожеж такого роду.

Подальші дослідження будуть направленні на виявлення закономірностей та опис чинників, які впливають на параметри показників, які описують процеси горіння електромобілів.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. C.C. Chan, Y.S. Wong Electric vehicles charge forward IEEE Power and Energy Magazine, 2 (6) (2004), pp. 24-33.
2. R. Matulka, The history of the electric car. In: Department of Energy, <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>, Assessed on 23 Mar 2022.
3. International Energy Agency (2022a) *Global EV Outlook, 2022: Securing Supplies for an Electric Future*; 2022 IIS 2380-S43. Available at: <https://statistical.proquest.com/statisticalinsight/result/pqpresultpage.previewtitle?docType=PQSI&titleUri=/content/2022/2380-S43.xml>.
4. Hammami A, Raymond N, Armand M. Lithium-ion batteries: runaway risk of forming toxic compounds. *Nature*. 2003 Aug 7;424(6949):635-6. doi: 10.1038/424635b. PMID: 12904779
5. Schmidt, A., Oehler, D., Weber, A., Wetzels, T., & Ivers-Tiffée, E. (2021). A multi scale multi domain model for large format lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 393, 139046.
6. Chen, M., Sun, Q., Li, Y., Wu, K., Liu, B., Peng, P., & Wang, Q. (2015). A thermal runaway simulation on a lithium titanate battery and the battery module. *Energies*, 8(1), 490-500.
7. Wu, W., Xiao, X., & Huang, X. (2012). The effect of battery design parameters on heat generation and utilization in a Li-ion cell. *Electrochimica Acta*, 83, 227-240.
8. Abada, S., Marlair, G., Lecocq, A., Petit, M., Sauvant-Moynot, V., & Huet, F. (2016). Safety focused modeling of lithium-ion batteries: A review. *Journal of Power Sources*, 306, 178-192.
9. Anderson, J., Larsson, F., Andersson, P., & Mellander, B. E. (2015, June). Thermal modeling of fire propagation in lithium-ion batteries. In *Proceedings of The 24th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, Gothenburg, Sweden (pp. 8-11).
10. Robinson, J. B., Darr, J. A., Eastwood, D. S., Hinds, G., Lee, P. D., Shearing, P. R., ... & Brett, D. J. (2014). Non-uniform temperature distribution in Li-ion batteries during discharge—A combined thermal imaging, X-ray micro-tomography and electrochemical impedance approach. *Journal of Power Sources*, 252, 51-57.
11. Wilke, S., Schweitzer, B., Khateeb, S., & Al-Hallaj, S. (2017). Preventing thermal runaway propagation in lithium ion battery packs using a phase change composite material: An experimental study. *Journal of Power Sources*, 340, 51-59.
12. Wu, T., Chen, H., Wang, Q., & Sun, J. (2018). Comparison analysis on the thermal runaway of lithium-ion battery under two heating modes. *Journal of hazardous materials*, 344, 733-741.
13. Liu, Y., Huo, R., Qin, H., Li, X., Wei, D., & Zeng, T. (2020). Overcharge

investigation of degradations and behaviors of large format lithium ion battery with Li (Ni<sub>0.6</sub>Co<sub>0.2</sub>Mn<sub>0.2</sub>) O<sub>2</sub> cathode. *Journal of Energy Storage*, 31, 101643.

14. Ye, J., Chen, H., Wang, Q., Huang, P., Sun, J., & Lo, S. (2016). Thermal behavior and failure mechanism of lithium ion cells during overcharge under adiabatic conditions. *Applied energy*, 182, 464-474.

15. Xu, J., Liu, B., Wang, L., & Shang, S. (2015). Dynamic mechanical integrity of cylindrical lithium-ion battery cell upon crushing. *Engineering Failure Analysis*, 53, 97-110.

16. Greve, L., & Fehrenbach, C. (2012). Mechanical testing and macro-mechanical finite element simulation of the deformation, fracture, and short circuit initiation of cylindrical Lithium ion battery cells. *Journal of Power Sources*, 214, 377-385.

17. Liu, B., Yin, S., & Xu, J. (2016). Integrated computation model of lithium-ion battery subject to nail penetration. *Applied Energy*, 183, 278-289.

18. Гаврилюк А. Ф., Кушнір А.П. (2022). Аналіз пожежної небезпеки електромобілів за термічною стабільністю силової літійової акумуляторної батареї. *Пожежна безпека*, 40, 31-39. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.04>.

19. Sturm, P., Föbleitner, P., Fruhwirt, D., Galler, R., Wenighofer, R., Heindl, S. F., ... & Heger, O. (2022). Fire tests with lithium-ion battery electric vehicles in road tunnels. *Fire safety journal*, 134, 103695

20. Gavryliuk, A., Yakovchuk, R., Chalyu, D., Lemishko, M., & Tur, N. (2023). Determination of fire protection distances during a tesla model s fire in a closed parking lot. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 122(10).

21. Deckers, X., Haga, S., Tilley, N., & Merci, B. (2013). Smoke control in case of fire in a large car park: CFD simulations of full-scale configurations. *Fire Safety Journal*, 57, 22-34.

22. Гаврилюк А.Ф., Васильєва О.Е. (2023). Аналіз стану протипожежного захисту електромобілів. *Пожежна безпека*, 32-42. <https://doi.org/10.32447/20786662.42.2023.04>

23. Ping, P., Wang, Q., Huang, P., Li, K., Sun, J., Kong, D., & Chen, C. (2015). Study of the fire behavior of high-energy lithium-ion batteries with full-scale burning test. *Journal of Power Sources*, 285, 80-89.

24. Kang, S., Kwon, M., Choi, J. Y., & Choi, S. (2023). Full-scale fire testing of battery electric vehicles. *Applied Energy*, 332, 120497.

25. Golubkov, A. W., Fuchs, D., Wagner, J., Wiltsche, H., Stangl, C., Fauler, G., ... & Hacker, V. (2014). Thermal-runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metal-oxide and olivin-type cathodes. *Rsc Advances*, 4(7), 3633-3642.

26. Kang, S., Kwon, M., Choi, J. Y., & Choi, S. (2023). Full-scale fire testing of battery electric vehicles. *Applied Energy*, 332, 120497.

27. Hynynen, J., Willstrand, O., Blomqvist, P., & Andersson, P. (2023). Analysis of combustion gases from large-scale electric vehicle fire tests. *Fire Safety Journal*, 139, 103829.

28. Лабай В. Й. Тепломасообмін / В. Й. Лабай. — Львів: Тріада-Плюс, 1998. — 255 с.

29. Kang, S., Kwon, M., Choi, J. Y., & Choi, S. (2023). Full-scale fire testing of battery electric vehicles. *Applied Energy*, 332, 120497

30. Sturm, P., Föbleitner, P., Fruhwirt, D., Galler, R., Wenighofer, R., Heindl, S. F., ... & Heger, O. (2022). Fire tests with lithium-ion battery electric vehicles in road tunnels. *Fire safety journal*, 134, 103695.].

31. Hynynen, J., Willstrand, O., Blomqvist, P., & Andersson, P. (2023). Analysis of combustion gases from large-scale electric vehicle fire tests. *Fire Safety Journal*, 139, 103829.

32. Чепурний М. М. Основи технічної термодинаміки / М. М. Чепурний, С. Й. Ткаченко — Вінниця: Поділля-2000, 2004. — 358 с.

33. Hadjisophocleous, G. V., & Mehaffey, J. R. (2016). Fire scenarios. *SFPE handbook of fire protection engineering*, 1262-1288.

34. Lam, C., MacNeil, D., Kroeker, R., Lougheed, G., & Lalime, G. (2016, October). Full-scale fire testing of electric and internal combustion engine vehicles. In 4th International conference on fire in vehicle, Baltimore.
35. Kang, S., Kwon, M., Choi, J. Y., & Choi, S. (2023). Full-scale fire testing of battery electric vehicles. *Applied Energy*, 332, 120497
36. Zhang, Z. J., Ramadass, P., & Fang, W. (2014). Safety of lithium-ion batteries. In *Lithium-ion batteries* (pp. 409-435).
37. Chen, S., Wang, Z., Wang, J., Tong, X., & Yan, W. (2020). Lower explosion limit of the vented gases from Li-ion batteries thermal runaway in high temperature condition. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 63, 103992
38. Documentation for Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations (IDLHs) for Hydrogen Fluoride (As F); The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH): Washington, DC, USA, 1994
39. Larsson, F., Andersson, P., & Mellander, B. E. (2016). Lithium-ion battery aspects on fires in electrified vehicles on the basis of experimental abuse tests. *Batteries*, 2(2), 9.
40. Larsson, F., Andersson, P., & Mellander, B. E. (2016). Lithium-ion battery aspects on fires in electrified vehicles on the basis of experimental abuse tests. *Batteries*, 2(2), 9.
41. Ribière, P., Grugeon, S., Morcrette, M., Boyanov, S., Laruelle, S., & Marlair, G. (2012). Investigation on the fire-induced hazards of Li-ion battery cells by fire calorimetry. *Energy & Environmental Science*, 5(1), 5271-5280.]
42. Larsson, F., Andersson, P., Blomqvist, P., & Mellander, B. E. (2017). Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires. *Scientific reports*, 7(1), 10018.
43. Zhang, Q., Niu, J., Zhao, Z., & Wang, Q. (2022). Research on the effect of thermal runaway gas components and explosion limits of lithium-ion batteries under different charge states. *Journal of Energy Storage*, 45, 103759.
44. Gully, B., Helgesen, H., Skogtvedt, J. E., Kostopoulos, D., Mjøs, N., Huser, A., ... & Sverud, T. (2019). Technical Reference for Li-ion Battery Explosion Risk and Fire Suppression. DNV GL, 1025.
45. Gully, B., Helgesen, H., Skogtvedt, J. E., Kostopoulos, D., Mjøs, N., Huser, A., ... & Sverud, T. (2019). Technical Reference for Li-ion Battery Explosion Risk and Fire Suppression. DNV GL, 1025.
46. Zhang, Q., Niu, J., Zhao, Z., & Wang, Q. (2022). Research on the effect of thermal runaway gas components and explosion limits of lithium-ion batteries under different charge states. *Journal of Energy Storage*, 45, 103759.

## REFERENCES

1. C.C. Chan, Y.S. Wong Electric vehicles charge forward *IEEE Power and Energy Magazine*, 2 (6) (2004), pp. 24-33.
2. R. Matulka, The history of the electric car. In: Department of Energy, <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>, Assessed on 23 Mar 2022.
3. International Energy Agency (2022a) *Global EV Outlook, 2022: Securing Supplies for an Electric Future;2022 IIS 2380-S43*. Available at: <https://statistical.proquest.com/statisticalinsight/result/pqpresultpage.previewtitle?docType=PQSI&titleUri=/content/2022/2380-S43.xml> .
4. Hammami A, Raymond N, Armand M. Lithium-ion batteries: runaway risk of forming toxic compounds. *Nature*. 2003 Aug 7;424(6949):635-6. doi: 10.1038/424635b. PMID: 12904779
5. Schmidt, A., Oehler, D., Weber, A., Wetzel, T., & Ivers-Tiffée, E. (2021). A multi scale multi domain model for large format lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 393, 139046.

6. Chen, M., Sun, Q., Li, Y., Wu, K., Liu, B., Peng, P., & Wang, Q. (2015). A thermal runaway simulation on a lithium titanate battery and the battery module. *Energies*, 8(1), 490-500.
7. Wu, W., Xiao, X., & Huang, X. (2012). The effect of battery design parameters on heat generation and utilization in a Li-ion cell. *Electrochimica Acta*, 83, 227-240.
8. Abada, S., Marlair, G., Lecocq, A., Petit, M., Sauvant-Moynot, V., & Huet, F. (2016). Safety focused modeling of lithium-ion batteries: A review. *Journal of Power Sources*, 306, 178-192.
9. Anderson, J., Larsson, F., Andersson, P., & Mellander, B. E. (2015, June). Thermal modeling of fire propagation in lithium-ion batteries. In *Proceedings of The 24th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, Gothenburg, Sweden (pp. 8-11).
10. Robinson, J. B., Darr, J. A., Eastwood, D. S., Hinds, G., Lee, P. D., Shearing, P. R., ... & Brett, D. J. (2014). Non-uniform temperature distribution in Li-ion batteries during discharge—A combined thermal imaging, X-ray micro-tomography and electrochemical impedance approach. *Journal of Power Sources*, 252, 51-57.
11. Wilke, S., Schweitzer, B., Khateeb, S., & Al-Hallaj, S. (2017). Preventing thermal runaway propagation in lithium ion battery packs using a phase change composite material: An experimental study. *Journal of Power Sources*, 340, 51-59.
12. Wu, T., Chen, H., Wang, Q., & Sun, J. (2018). Comparison analysis on the thermal runaway of lithium-ion battery under two heating modes. *Journal of hazardous materials*, 344, 733-741.
13. Liu, Y., Huo, R., Qin, H., Li, X., Wei, D., & Zeng, T. (2020). Overcharge investigation of degradations and behaviors of large format lithium ion battery with Li (Ni<sub>0.6</sub>Co<sub>0.2</sub>Mn<sub>0.2</sub>) O<sub>2</sub> cathode. *Journal of Energy Storage*, 31, 101643.
14. Ye, J., Chen, H., Wang, Q., Huang, P., Sun, J., & Lo, S. (2016). Thermal behavior and failure mechanism of lithium ion cells during overcharge under adiabatic conditions. *Applied energy*, 182, 464-474.
15. Xu, J., Liu, B., Wang, L., & Shang, S. (2015). Dynamic mechanical integrity of cylindrical lithium-ion battery cell upon crushing. *Engineering Failure Analysis*, 53, 97-110.
16. Greve, L., & Fehrenbach, C. (2012). Mechanical testing and macro-mechanical finite element simulation of the deformation, fracture, and short circuit initiation of cylindrical Lithium ion battery cells. *Journal of Power Sources*, 214, 377-385.
17. Liu, B., Yin, S., & Xu, J. (2016). Integrated computation model of lithium-ion battery subject to nail penetration. *Applied Energy*, 183, 278-289.
18. Gavryliuk A. F., Kushnir A.P. (2022). Analiz pozhezhnoi nebezpeky elektromobiliv za termichnoiu stabilnistiu sylovoi litiievoi akumuliatornoj batarei. *Pozhezhna bezpeka*, 40, 31-39. <https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.04>.
19. Sturm, P., Föbtleitner, P., Fruhwirt, D., Galler, R., Wenighofer, R., Heindl, S. F., ... & Heger, O. (2022). Fire tests with lithium-ion battery electric vehicles in road tunnels. *Fire safety journal*, 134, 103695
20. Gavryliuk, A., Yakovchuk, R., Chalyy, D., Lemishko, M., & Tur, N. (2023). Determination of fire protection distances during a tesla model s fire in a closed parking lot. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 122(10).
21. Deckers, X., Haga, S., Tilley, N., & Merci, B. (2013). Smoke control in case of fire in a large car park: CFD simulations of full-scale configurations. *Fire Safety Journal*, 57, 22-34.
22. Gavryliuk A.F., Vasylieva O.E. (2023). Analiz stanu protypozhezhnoho zakhystu elektromobiliv. *Pozhezhna bezpeka*, 42, 32-42. <https://doi.org/10.32447/20786662.42.2023.04>
23. Ping, P., Wang, Q., Huang, P., Li, K., Sun, J., Kong, D., & Chen, C. (2015). Study

of the fire behavior of high-energy lithium-ion batteries with full-scale burning test. *Journal of Power Sources*, 285, 80-89.

24. Kang, S., Kwon, M., Choi, J. Y., & Choi, S. (2023). Full-scale fire testing of battery electric vehicles. *Applied Energy*, 332, 120497.

25. Golubkov, A. W., Fuchs, D., Wagner, J., Wiltsche, H., Stangl, C., Fauler, G., ... & Hacker, V. (2014). Thermal-runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metal-oxide and olivin-type cathodes. *Rsc Advances*, 4(7), 3633-3642.

26. Kang, S., Kwon, M., Choi, J. Y., & Choi, S. (2023). Full-scale fire testing of battery electric vehicles. *Applied Energy*, 332, 120497.

27. Hynynen, J., Willstrand, O., Blomqvist, P., & Andersson, P. (2023). Analysis of combustion gases from large-scale electric vehicle fire tests. *Fire Safety Journal*, 139, 103829.

28. Labai V. Y. *Teplomasoobmin / V. Y. Labai.* — Lviv: Triada-Plus, 1998. — 255 s.

29. Kang, S., Kwon, M., Choi, J. Y., & Choi, S. (2023). Full-scale fire testing of battery electric vehicles. *Applied Energy*, 332, 120497

30. Sturm, P., Föbtleitner, P., Fruhwirt, D., Galler, R., Wenighofer, R., Heindl, S. F., ... & Heger, O. (2022). Fire tests with lithium-ion battery electric vehicles in road tunnels. *Fire safety journal*, 134, 103695.].

31. Wang, Z., Yang, H., Li, Y., Wang, G., & Wang, J. (2019). Thermal runaway and fire behaviors of large-scale lithium ion batteries with different heating methods. *Journal of hazardous materials*, 379, 120730.

32. Chepurnyi M. M. *Osnovy tekhnichnoi termodynamiky / M. M. Chepurnyi, S. Y. Tkachenko* — Vinnytsia: Podillia-2000, 2004. — 358 s.

33. Hadjisophocleous, G. V., & Mehaffey, J. R. (2016). Fire scenarios. *SFPE handbook of fire protection engineering*, 1262-1288.

34. Lam, C., MacNeil, D., Kroeker, R., Lougheed, G., & Lalime, G. (2016, October). Full-scale fire testing of electric and internal combustion engine vehicles. In 4th International conference on fire in vehicle, Baltimore.

35. Kang, S., Kwon, M., Choi, J. Y., & Choi, S. (2023). Full-scale fire testing of battery electric vehicles. *Applied Energy*, 332, 120497

36. Zhang, Z. J., Ramadass, P., & Fang, W. (2014). Safety of lithium-ion batteries. In *Lithium-ion batteries* (pp. 409-435).

37. Chen, S., Wang, Z., Wang, J., Tong, X., & Yan, W. (2020). Lower explosion limit of the vented gases from Li-ion batteries thermal runaway in high temperature condition. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 63, 103992

38. Documentation for Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations (IDLHs) for Hydrogen Fluoride (As F); The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH): Washington, DC, USA, 1994

39. Larsson, F., Andersson, P., & Mellander, B. E. (2016). Lithium-ion battery aspects on fires in electrified vehicles on the basis of experimental abuse tests. *Batteries*, 2(2), 9.

40. Larsson, F., Andersson, P., & Mellander, B. E. (2016). Lithium-ion battery aspects on fires in electrified vehicles on the basis of experimental abuse tests. *Batteries*, 2(2), 9.

41. Ribière, P., Grugeon, S., Morcrette, M., Boyanov, S., Laruelle, S., & Marlair, G. (2012). Investigation on the fire-induced hazards of Li-ion battery cells by fire calorimetry. *Energy & Environmental Science*, 5(1), 5271-5280.]

42. Larsson, F., Andersson, P., Blomqvist, P., & Mellander, B. E. (2017). Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires. *Scientific reports*, 7(1), 10018.

43. Zhang, Q., Niu, J., Zhao, Z., & Wang, Q. (2022). Research on the effect of thermal runaway gas components and explosion limits of lithium-ion batteries under different charge states. *Journal of Energy Storage*, 45, 103759.

44. Gully, B., Helgesen, H., Skogtvedt, J. E., Kostopoulos, D., Mjøs, N., Huser, A., ...

& Sverud, T. (2019). Technical Reference for Li-ion Battery Explosion Risk and Fire Suppression. DNV GL, 1025.

45. Gully, B., Helgesen, H., Skogtvedt, J. E., Kostopoulos, D., Mjøs, N., Huser, A., ... & Sverud, T. (2019). Technical Reference for Li-ion Battery Explosion Risk and Fire Suppression. DNV GL, 1025.

46. Zhang, Q., Niu, J., Zhao, Z., & Wang, Q. (2022). Research on the effect of thermal runaway gas components and explosion limits of lithium-ion batteries under different charge states. Journal of Energy Storage, 45, 103759.

*Andrii GAVRYLIUK, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
(ORCID:0000-0002-8727-9950),  
Lviv State University of Life Safety*

## **STUDY OF INDICATORS DESCRIBING THE COMBUSTION PROCESSES OF ELECTRIC VEHICLES**

*The number of electric vehicles in private or commercial use continues to grow rapidly. The increase in the number of such vehicles, both in absolute and relative terms, leads to an increase in various hazards. One of these important hazards is the fire of these vehicles.*

*The aim of this paper is to analyse and characterise the development of electric vehicle combustion processes, as well as the indicators that these processes can describe.*

*Analysis, interrelation and understanding of the indicators describing electric vehicle fires will create the basis for developing an understanding of the characteristics of such fires, as well as prerequisites for effective methods of combating them.*

*Based on the analysis of modern domestic and foreign literature, it has been established that insufficient attention has been paid to the study of indicators that comprehensively describe and summarise the processes of combustion of electric vehicles. This gives grounds to assert the expediency of conducting a study of this kind.*

*During electric vehicle fires, the temperature of the combustion products can reach up to 1500 °C, and when the power battery alone burns, it can reach 800-900 °C.*

*The total heat release energy from the combustion of electric vehicles depends on the capacity of the power battery, the degree of its charge, and for an electric vehicle with a fully charged 64 kWh battery, it is more than 9 GJ.*

*In the case of electric vehicle fires, the heat flux power also depends on the capacity and charge of the power battery and ranges from 6 MW for an electric vehicle with a battery capacity of 39 kWh, while the heat flux density is in the range of 40-50 kW/m<sup>2</sup>.*

*According to the fire growth rate coefficient, such fires are fast, with a fire growth rate coefficient of more than 0.0111 kW/s<sup>2</sup>.*

*The specific heat of combustion of modern electric vehicles is more than 30.5 MJ/kg, which is more than 2 times higher than the combustion of lumber.*

*During the release of gases, with the formation of an explosive concentration, the explosion pressure in an electric vehicle fire can range from 1,35 kPa to 1,45 kPa.*

**Key words:** *electric vehicle fire, lithium-ion battery, fire hazard of an electric vehicle.*