

УДК 629.111

**ОСОБЛИВОСТІ FDS МОДЕЛЮВАННЯ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ
ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ СИЛОВИХ ЛІТІЙ-ІОННИХ
БАТАРЕЙ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ***Андрій Гаврилюк*, кандидат технічних наук, доцент*Роман Яковчук*, доктор технічних наук, доцент**Львівський державний університет безпеки життєдіяльності**

Окреслено тенденції розвитку електромобілів в умовах сьогодення. Описано програмний комплекс FDS, який успішно використовується для моделювання пожеж, в тому числі і електромобілів. Проаналізовано та окреслено основні чинники, які слід враховувати при створенні моделі у середовищі FDS для отримання збіжності результатів моделювання із результатами експериментальних досліджень.

Ключові слова: пожежа, електромобіль, літій-іонна батарея, пожежна небезпека електромобілів.

**FEATURES OF FDS MODELLING IN THE RESEARCH
OF THE FIRE HAZARD OF LITHIUM-ION BATTERIES OF
ELECTRIC VEHICLES***Andrii Gavryliuk*, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor*Roman Yakovchuk*, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor**Lviv State University of Life Safety**

The trends in the development of electric vehicles in modern conditions are outlined. The FDS software package, which is successfully used for modelling fires, including electric vehicles, is described. The main factors that should be taken into account when creating a model in the FDS environment to obtain convergence of results with experimental research are analysed and outlined.

Keywords: fire, electric vehicle, fire hazard of electric vehicles, lithium-ion battery.

З початку 2014 року росія загарбала сотні родовищ корисних копалин, вартість яких оцінюється 15 трлн дол США, що в 30 разів перевищує вартість відбудови України. Більше того, Україна є найбагатшою країною Європи за покладами літію, який називають золотом 21 століття [1]. Власне літій є ключовим компонентом який використовується у силових батареях електромобілів (і не тільки) кількість яких (електромобілів) у світі продовжує стрімко зростати [2], як і кількість пожеж за їх участю [3,4]. Тому різнобічні дослідження пожежної безпеки як електромобілів в цілому,

так і окремих їх компонентів створить підґрунтя для забезпечення їх пожежної безпеки.

Світова наукова спільнота поряд із експериментальними дослідженнями пожежної небезпеки літій-іонних батарей використовує і комп'ютерне моделювання. Власне програмний комплекс FDS набув чи не найбільшого поширення [5-7].

FDS моделює сценарії розвитку пожежі з використанням обчислювальної гідродинамічної моделі (CFD), оптимізованої для низькошвидкісних температурно-залежних потоків. Такий підхід виявляється дуже гнучким, і може бути застосований до різних пожеж, починаючи від горіння в печах і до пожеж на нафтових танкерах. FDS реалізує обчислювальну гідродинамічну модель тепломасопереносу при горінні, чисельно вирішує рівняння Нав'є-Стокса для низькошвидкісних температурно-залежних потоків, особлива увага приділяється поширенню диму й теплопередачі при пожежі.

У звичайному вигляді система рівнянь Нав'є-Стокса складається з рівнянь руху та нерозривності. У векторному вигляді для нестисливої рідини їх записують у такий спосіб:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho V) + \nabla[\rho V \otimes V] = -\nabla p + \nabla[(\mu + \mu_t)(\nabla V + (\nabla V)^T)] + S, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla(\rho V h) = \nabla \left(\left(\frac{\lambda}{c_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h \right) + Q_{rad}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_k) + \nabla(\rho V Y_k) = \nabla \left(\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla Y_k \right) + Q_k. \quad (4)$$

де t – час; ρ – густина; V – вектор відносної швидкості; p – відносний тиск; μ – молекулярна динамічна в'язкість; μ_t – турбулентна динамічна в'язкість; λ – коефіцієнт теплопровідності суміші; Pr_t – турбулентне число Прандтля; Sc – число Шмідта; Sc_t – турбулентне число Шмідта; Y_k – концентрація k -го компонента реакції горіння.

При моделюванні «класичних» пожеж приймаються певні припущення, так як не можливо точно врахувати фізичні властивості палива, умови навколишнього середовища, теплові параметри полум'я тощо. Натомість пожежі літій-іонних батарей електромобілів мають ще більш виражений стохастичний характер.

Це пов'язано із неоднорідністю та різноманітністю матеріалів [8], які використовуються у літій-іонних батареях, вмістом електричної енергії, перебігом хімічних реакцій між катодом і анодом при руйнуванні сепаратора, що призводить до виділення тепла, розкладом електроліту, виникненням внутрішнього короткого замикання, що теж призводить до викиду теплової енергії. Такі процеси призводять до зміни теплофізичних характеристик компонентів літій-іонних батарей.

При нагріванні літій-іонних батарей пожежа не завжди починається зі сторони нагрівання. Викид вентиляційних газів через вентиляційний клапан залежить від матеріалів катода, анода, та стану заряду батареї, що впливає на самозаймання вентиляційних газів. На розмір факела горіння вентиляційних газів впливає конструкція вентиляційного отвору, ступінь заряду та ємність батареї. Пожежі, які виникають у літій-іонних батареях беруть свій початок з одного чи кількох елементів. І власне розміщення даних елементів у загальній структурі літій-іонної батареї впливатиме на поширення пожежі. Масовий склад вибухо-небезпечних газів, (серед яких є і водень) які генеруються при виникненні екзотермічної реакції заложитиме від матеріалів виготовлення компонентів батареї. Термін і умови використання літій-іонних батареях будуть впливати на утворення дендритів, які у свою чергу впливають на ймовірність виникнення внутрішнього короткого замикання внаслідок пробиття сепаратора. Горіння літій-іонних батарей відбувається у сукупності із горінням їх корпусу, що також впливає на теплові параметри пожежі.

Висновок. Таким чином при моделюванні пожеж літій-іонної батареї необхідно враховувати такі чинники: 1. матеріал виготовлення катода, анода, сепаратора та електроліту; 2. технічні параметри літій-іонної батареї такі як ємність і стан заряду; 3. умови впливу джерела займання; 4. розміщення елемента (елементів), відносно всієї літій-іонної батареї, з яких буде починатись займання. 5. умови і термін використання досліджуваного взірця літій-іонної батареї.

Список літератури

1. Сьомка, В. О. (2022). Про перспективи розвитку літійового виробництва та хімічних джерел струму в Україні. Літійові пегматити Українського щита: Стенограма доповіді на засіданні Президії НАН України 25 травня 2022 року. Вісник НАН України, (7), 75–80. <https://doi.org/10.15407/vsn2022.07.075>
2. Feng, X., Ouyang, M., Liu, X., Lu, L., Xia, Y., & He, X. (2018). Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review. *Energy storage materials*, 10, 246-267.

3. Liao, Z., Zhang, S., Li, K., Zhang, G., & Habetler, T. G. (2019). A survey of methods for monitoring and detecting thermal runaway of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 436, 226879.

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

5. Floyd, J. E., & McGrattan, K. B. (2009). Extending the mixture fraction concept to address under-ventilated fires. *Fire Safety Journal*, 44(3), 291-300.

6. 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*, 2(10 (122)), 39–46. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.277999>

7. Gavryliuk, A., Yakovchuk, R., Ballo, Y., Ruduk, Y. (2023). Thermal Modeling of the Electric Vehicle Fire Hazard Effects on Parking Building. *SAE Int. J. Trans. Safety* 11(3):2023, doi:10.4271/09-11-03-0013

8. Гаврилюк А. Ф. & Кушнір А.П. (2022). Аналіз пожежної небезпеки електромобілів за термічною стабільністю силової літійєвої акумуляторної батареї. *Пожежна безпека*, 40, 31-39.

<https://doi.org/https://doi.org/10.32447/20786662.40.2022.04>