

FRI-2.206-1-TMS-08

LIVE CYCLE ASSESMENT OF VEHICLE LITHIUM-ION BATTERIES⁸

Angel Garev Dyndikov – PhD Student

Department Engines and Vehicles,
University of Ruse “Angel Kanchev”
Tel.: +359 82 888 527
E-mail: angelgarev@mail.bg

Assoc. Prof. Ivan Iliev Evtimov, PhD

Department Engines and Vehicles,
University of Ruse “Angel Kanchev”
Phone: +359 82 888 527
E-mail: ievtimov@uni-ruse.bg

Prof. Rosen Petrov Ivanov, DSc

Department Engines and Vehicles,
University of Ruse “Angel Kanchev”
Phone: +359 82 888 528
E-mail: rossen@uni-ruse.bg

***Abstract:** The presented work concerns analysis of the spent energy and GHG emissions from production of Lithium batteries. The contents of metals and other materials are regarded. Energy spent for production of materials and its recycling is estimated. Finally, the LCA of energy and harmful emissions is done, including all phases of production - from raw materials to completely finished batteries, with using of different types of fuel or energy (NG, electricity etc.)*

***Keywords:** electric vehicle battery, Li-ion battery, energy consumption, GHG emissions*

ВЪВЕДЕНИЕ

С навлизането на масовия пазар на електрически превозни средства, въглеродните емисии, свързани с производството на литиево-йонните батерии, се превърнаха в едно от основните задачи за определяне влиянието им върху глобалното затопляне, свързано с отделянето на въглеродни емисии при производството и рециклирането им. Сред всички видове EV батерии, литиево-йонните батерии в момента са най-продаваните на пазара поради предимствата на високата енергийна плътност, висока плътност на мощността, дълъг експлоатационен живот и благоприятни екологични свойства в сравнение с оловната киселина батерии и Ni-MH батерии. В момента литиево-йонните батерии за превозни средства са разделени на три категории в зависимост от анодите им – LFP, NMC и LMO батерии. Повечето от катодите на тези батерии съдържат редки минерали в състава си като литий (Li), кобалт (Co) и манган (Mn). Важността на елементите са променливи за различни видове батерии. Например около 35% от производството на литий и 48% от производството на кобалт се консумират в производството на батерии.

Производството на батерии е един от основните източници на парникови газове от производството на електрически превозни средства. В този случай се препоръчва рециклиране на батериите, за да се намали използваната енергия за производството им и намаляване на емисиите на парникови газове, както и да доведе до значително спестяване на природни ресурси. Също така, ускоряване производството на литиеви батерии доведе до рязко нарастваща необходимост на минерали като литий (Li), кобалт (Co) и манган (Mn). Отработените батерии могат да се считат за вторичен източник на тези минерали.

⁸ Докладът е представен на сесията на 29 октомври 2022 с оригинално заглавие на български език: ОЦЕНКА НА ЖИЗНЕНИЯ ЦИКЪЛ НА ЛИТИЕВО-ЙОННИ БАТЕРИИ ЗА АВТОМОБИЛИ

От друга страна, от екологична гледна точка, рециклирането на батериите е важно, за да се избегнат опасните резултати от наличието на екологично замърсяване. Следователно, значението зад рециклирането на батериите идва не само за запазване на ресурсите, но и за избягване екологични тежести (Yuqing Wang, Ning An, Lei Wen et al., 2021). Поради това от решаващо значение е да има подробен анализ на жизнения цикъл на потреблението на енергия и емисиите на парникови газове от минното дело, производството на метали, различни елементи на батерията, сглобяване на батерията и рециклирането ѝ.

Различни анализи на жизнения цикъл на литиевите батерии вече са направени през последните години (Saeed Rahimpour Golroudbary, Daniel Calisaya-Azpilcueta, Andrzej Kraslawski, 2019). Въпреки това, изчерпателна картина на жизнения цикъл на потреблението на енергия и парниковите газове емисии от различни критични минерали и тяхната промяна с течение на времето все още не е предоставена. Основно изследванията са фокусирани само върху един етап от веригата на доставки, напр. на производствения етап или етап на рециклиране (Qiang Dai, Jarod C. Kelly, Linda Gaines and Michael Wang, 2019).

ИЗЛОЖЕНИЕ

Метод на изследване

При изследването за определяне разхода на енергия и отделените вредни емисии при производството на акумулаторните батерии за електромобили се използва LCA (Life cycle assessment). Това е приета методология за оценка на въздействията върху околната среда, свързано с всички етапи от жизнения цикъл на даден продукт, процес или услуга. Например, в разглеждания случай ще се разглежда въздействията върху околната среда при добив и преработка на суровини, на етапа производство, разпространение и експлоатация на батериите, включително и последният етап – рециклиране на батериите.

Основно място заемат три балансиращи цикъла. Първият е свързан с проучване и добив на руда, производство на метали и генериране на отпадъци, както и тяхното събиране. Вторият балансиращ елемент включва производство на елементи на батерията както и сглобяването ѝ, а третият - събиране на батериите след вторият етап на експлоатация и рециклирането им. В етапа на рециклиране, въздействието върху околната среда обикновено се разглежда при два металургични процеси – пирометалургия и хидрометалургия

Оценката, която се трябва да се даде в края на целия жизнен цикъл трябва да се фокусира върху количеството енергия и отделените емисии за целия жизнен цикъл на батериите в kWh/kWh и $kgCO_{2-eq}/kWh$. Всички вредни емисии са приведени към въглероден двуокис – CO_{2-eq} .

Разработените модели за описване процесите при производство на акумулаторните батерии са все още оскъдни в изнесените публикации (Qiang Dai, Jarod C. Kelly, Linda Gaines and Michael Wang, 2019). От работния колектив са съставени подобрени математични модели, които описват разходът на енергия и отделените вредни емисии на всеки от етапите от жизнения цикъл.

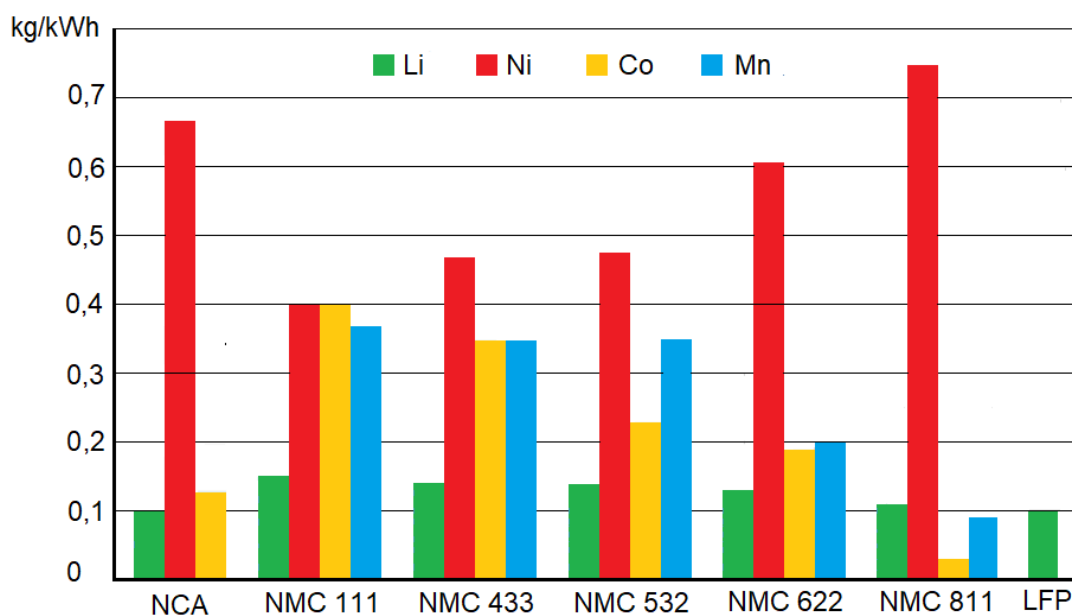
Резултати от теоретичното изследване за необходимата първична енергия за производство на литиевите батерии и отделените въглеродни емисии за жизнения им цикъл

Етапите на жизнения цикъл на различните литиеви батерии, произведени в един и същи континент или държава могат да се различават един от друг (Han Hao, Zhexuan Mu, Shuhua Jiang, Zongwei Liu and Fuquan Zhao, 2017). Една от причините за това се дължи на различията в снабдяването с материали и използваните химични процеси за получаване на желания продукт. Методите за транспортиране и използваните маршрутите също могат да бъдат много различни за различни източници на един и същ вид материал. Добивът и рафинирането често се извършват на отделни места и рафинирането на един материал може да се направи в няколко етапа.

Използването на енергия в различните мини за добиване на различните метали и материали може да се различава значително в зависимост от типа мината и процентното съдържание на рудата. Единствената отчетена енергия от една мина с използването на

дизелово гориво е 163 kWh/тон добита руда от 0,32% кобалт и друга мина, използваща електричество – 61,7 kWh/тон добит руда от 0,51% кобалт.

Използването на различно съдържание на метали в литиевите батерии е изложено на по-голям риск при доставяне от страни с нестабилно държавно управление. Например, ако има ембарго за един от тези метали в страна, която притежава повечето от световното предлагане, наличното световно предлагане внезапно ще спадне. Разпределението на световното предлагане на някои метали по този начин могат да повлияят на цялата верига за доставка на батерията, особено когато тези метали е невъзможно да бъдат заменени с други. Например на фиг. 1 е показано различно съдържание на металите Li, Ni, Co и Mn в катодите на литиевите батерии, което зависи от стремежът за производство на батерии с по-голяма енергийна плътност (NMC 811 е катоден материал, който производителите търсят за следващо поколение батерии, тъй като тенденцията се движи към батерии с по-висока енергийна плътност).



Фиг. 1. Различно съдържание на металите Li, Ni, Co и Mn в катодите на литиевите батерии

NMC 811 както NCA също има най-ниското съдържание на кобалт и най-високото съдържание на никел от представените катодни материали за kWh капацитет на батерията. NCA се използва и като катоден материал в много автомобили и тъй като NMC 811 и NCA имат високо съдържание на никел, търсенето на никел в батериите се очаква да се увеличи, докато търсенето на кобалтът ще намалее.

Изложеното по-горе дава основание да се предположи, че използването на енергията за добиване на руда с определено съдържание на металите и тяхното извличане от рудата са най-енергоемките етапи от производството на литиевите батерии (първите два етапа от жизнения цикъл). Изследванията в тази област посочват стойности около 70% от общата енергия, необходима за производство на литиевите батерии. Това са включително електрическа и топлинна енергия, получена от различни източници. Следователно за първия етап (проучване и добив на руда) се изразходват от 5,6 до 14% общата енергия за производство на батериите, което в реални стойности варира в границите от 13 до 40 kWh/kWh в зависимост от съдържанието на металите в рудата, особеностите на мината и използваният източник на енергия (колонка 1 на фиг. 2a). Следователно делът на втория етап от производството на батериите – производството на металите е в границите от 56 до 64,4% или от 126 до 184 kWh/kWh (колонка 2 на фиг. 2a).

Третият етап, свързан с производството на елементите на батерията може да се раздели на два подетапа, свързани с производството на клетъчни и модулни елементи. Обикновено третият етап, поради технологията на производство, често енергията за производство на отделните компоненти на батерията се дава заедно с операциите за монтаж на отделните

клетки и модули елементи като цяло. Като дял от общата енергия за производство на батериите се характеризират както следва: производството на клетки и тяхното сглобяване – 20% и производството на модулни компоненти – 5%. Четвъртият етап се характеризира с производството на опаковъчни елементи и сглобяване на батерията – 15%.

Последните изследвания показват, че при голям капацитет на предприятията за производство на батерийни клетки потреблението на енергия може да се сведе в рамките на 50 – 65 kWh електроенергия на kWh енергоемкост на батерията (Simon Kurland , 2020), но по-често срещана стойност е 60 kWh . Ако се приема като най-често очакван интервал на използваната енергия през целия цикъл на производство на батериите от 225 до 285 kWh/kWh, то производството на модулните клетки би представлявало 21 – 27% от общата енергия при производството на батериите. При развитие на съвременните технологии на производство този процент може реално да стане 20%. Съответно необходимата енергия за реализиране на посочените дейности са съответно – от 45 до 57 kWh/kWh за производството на отделните клетки, от 11 до 14 kWh/kWh за производство на модулните компоненти (колонки 3а и 3б на фиг. 2.а).

Четвъртият етап е свързан с производството на опаковъчни елементи и сглобяване на батерията, съответно за което е необходима енергия от 34 до 43 kWh/kWh (колонка 4 на фиг. 2.а).

Отделянето на емисии при добиването на руда зависи от използваната енергия. Например за добиването на 0,3 kg Co в 1 kWh батерия от кобалтова руда с 0,32% съдържание на Co се отделят приблизително 4 kg CO₂, а при използването на електричество, произведено от въглища и природен газ, за добиването на 0,3 kg Co в 1 kWh батерия от кобалтова руда с 0,51% съдържание на Co се отделят съответно около 6 и 3 kg CO₂. Общо за първия етап от жизнения цикъл на батерията, включващ проучването и добиването на руда ще се отделят при използване на различни източници на енергия от 1 до 32 kg CO₂/kWh. Ниската стойност се отнася за електрическа енергия от фотоволтаични системи, а високата – електрическа енергия от въглища.

Топлинната енергия, необходима за производството на клетки идва от природен газ, пара или електричество. Количеството на фабричната регенерирана топлина също влияе върху емисиите.

Въздействието върху околната среда от производството на батерии варира в зависимост от количествата и формата на използваната енергия; особено след като възобновяемите източници заместват електричеството от изкопаеми горива.

Понастоящем по-голямата част от лития се извлича от твърди скални мини или подземни резервоари за саламура и голяма част от енергията, използвана за извличането и преработката му, идва от изкопаеми горива, отделящи CO₂. По-специално при добива на твърди скали, за всеки тон добит литий във въздуха се отделят 15 тона CO₂ .

Материалите за батерията идват и с други разходи. Добивът на суровини като литий, кобалт и никел е трудоемък, изисква определен вид химикали и огромни количества вода – често от райони, където водата е оскъдна. Около 60% от кобалта в света идва от Демократична република Конго, където продължават да възникват въпроси относно нарушенията на човешките права, като например използването на детския труд.

За да се синтезират материалите, необходими за производството, е необходима топлина между 800 до 1 000 °C – температура, която може да бъде постигната рентабилно само чрез изгаряне на изкопаеми горива, което отново увеличава емисиите на CO₂.

Точно колко CO₂ се отделя в дългия процес на производство на батерия може да варира много в зависимост от това кои материали се използват, как се доставят и какви източници на енергия се използват в производството. По-голяма част от литиево-йонните батерии – около 77% от световните доставки, се произвеждат в Китай, където въглищата са основният енергиен източник.

Първото предизвикателство за изследователите е да намалят количествата метали, които трябва да се добиват за батерии за електромобили. Количествата варират в зависимост от типа батерия и модела на превозното средство, но една литиево-йонна батерия за

електромобил от тип, известен като NMC532 (Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide, $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{0.3}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$) може да съдържа около 8 kg литий, 35 kg никел, 20 kg манган и 14 kg кобалт, според данни от Националната лаборатория в Аргон (UChicago Argonne, LLC).

Цените на лития постоянно се увеличават, според Benchmark Mineral Intelligence (BMI). Фактът, че над 60% от преработвателния капацитет на лития се намират в Китай, е обезпокоителен, тъй като това може да представлява риск за веригите на доставка на електрически превозни средства в други региони, като САЩ и Европа. Очаква се търсенето на литиев карбонат ще нарасне около 4,5 пъти повече през 2030 год. спрямо 2020 год., а на кобалт за същия период около 2 пъти.

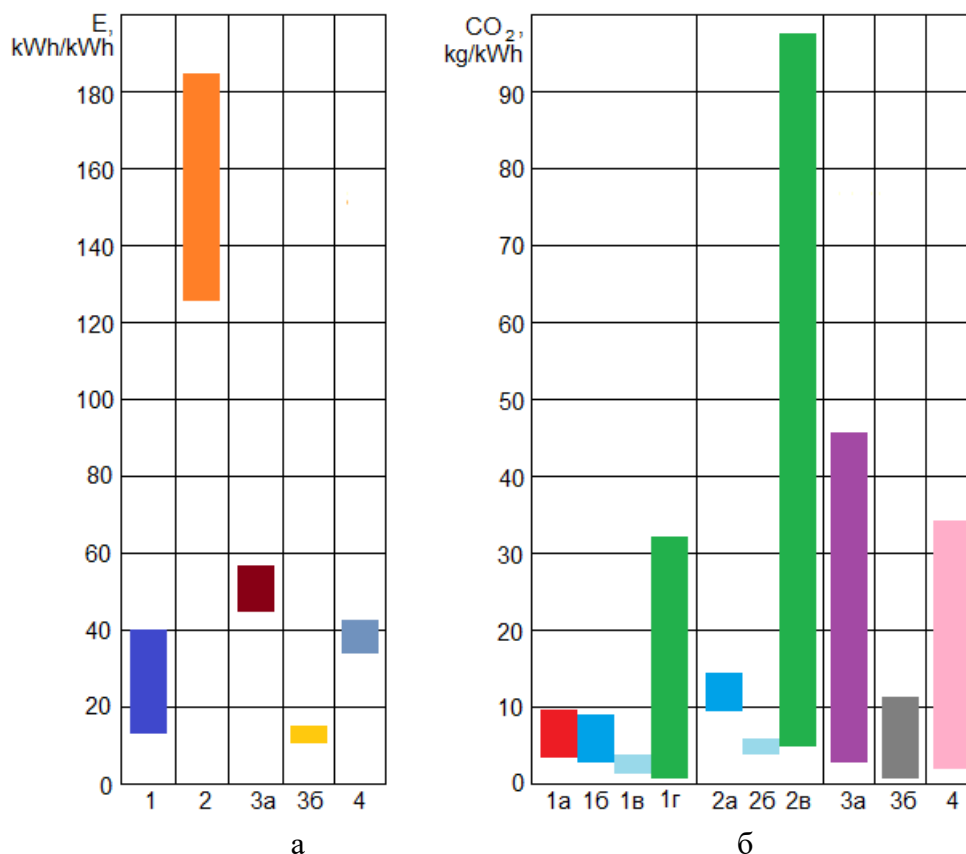
Проблемите с човешките права около добива на кобалта в Централна Африка в крайна сметка ще помогнат на никела да се наложи като основен метал в сегмента на батериите и електромобилите. Концентрацията на кобалта главно в Демократична република Конго прави метала силно податлив на ценови колебания. 8 от 14-те най-големи фирми за добив на кобалт са собственост на китайски компании, като те отговарят за 50% от износа на страната. Страни като Канада, Мароко и Куба също доставят кобалт на пазара.

Всичко изложено по-горе показва, че производство на литиево-йонните батерии е твърде сложен процес, обхващащ голям периметър от доставка на изходни материали, свързан с необходимостта от логистика, изградена са твърде високо ниво.

Данните са представят като емисии на парникови газове, изразени като kg еквивалент CO_2 -екв., отнесено към капацитета за съхранение в kWh. Въз основа на новите и прозрачни данни за оценката на капацитета на батерията 61 – 106 kg $\text{CO}_2\text{eq/kWh}$ е изчислена за най-често срещания тип NMC батерии. Стойността зависи главно от промяната на електрическия микс. Ако са включени по-малко прозрачни данни, максималната стойност е 146 kg $\text{CO}_2\text{eq/kWh}$. Изчисленият диапазон е значително по-нисък от по-ранните 150 – 200 kg $\text{CO}_2\text{eq/kWh}$ батерия през 2017 год. Основна причина е, че вече се произвеждат батерии с близо 100% електричество без изкопаеми горива, което все още не е обичайно, но вероятно ще бъде в бъдеще.

Резултатите от анализа на процесите, протичащи в различните етапи при производство на литиевите батерии, използвайки информацията в редица публикации и разработеният от авторите математичен модел, на фиг. 2 е показана една реална картина на необходимата енергия и отделените вредни емисии по време на различните етапи на производство на литиевите батерии. От гореизложеното може да се направи следното обобщение.

През първия етап (приучаване и добиване на рудата) се изразходват от 13 до 40 kWh/kWh енергия в зависимост от съдържанието на металите в рудата, особеностите на мината и използваният източник на енергия. Ако се използва дизелово гориво, то отделените емисии ще варират в границите от 3,1 до 9,6 kg $\text{CO}_2\text{eq/kWh}$ (колонка 1а на фиг. 2.9б). Използването на природен газ ще намали отделянето на вредни емисии с 0,1 до 0,4 kg $\text{CO}_2\text{eq/kWh}$ (колонка 1б на фиг. 2б), ако се отчете изтичане на 1,5% в атмосферата с ПГЗ 86, то предимството на природния газ като гориво изчезва, поради допълнителното замърсяване от изтичането на природния газ, еквивалентно на 1,2 – 3,6 kg $\text{CO}_2\text{eq/kWh}$ (колонка 1в на фиг. 2б). Ако през този етап се използва електрическа енергия с емисионен фактор 0,058 – 0,8 kg $\text{CO}_2\text{eq/kWh}$ (производство на електрическа енергия от фотоволтаични системи и енергиен микс с преобладаващи енергийни източници с въглища), ще се отделят



Фиг. 2. Разход на енергия (а) и отделени вредни емисии (б) при производство на литиево-йонни батерии

от 0,8 до 32 $kg\ CO_2eq/kWh$ (колонка 1г на фиг. 2б). Следователно за първия цикъл от жизнения цикъл на батерията при вложена енергия от 13 до 40 kWh/kWh могат да се отделят от 0,8 до 32 $kg\ CO_2eq/kWh$, като най-малката стойност се дължи на използването на електрическа енергия от фотоволтаични системи, а най-голямата – при използване на електрическа енергия с преобладаващ енергиен микс от въглищни електроцентрали (The European Power Sector in 2020). Тенденцията към производство на електрическа енергия от ВЕИ може значително да повлияе върху намаляване на въглеродните емисии през този етап на производство на батериите.

Вторият етап, свързан с производството на металите е най-енергоемък, при който се изразходва енергия в границите от 126 до 184 kWh/kWh (колонка 2 на фиг. 2а). Изследванията в тази област показват, че за производството на отделните материали се изразходва като електрическа енергия, така и топлинна в съотношение 2:1. Тако източник на топлинна енергия най-често се използва природен газ, при изгарянето и изтичането му в атмосферата се отделят съответно от 9,7 до 14,5 $kg\ CO_2eq/kWh$ (колонка 2а на фиг. 2б) и от 3,9 до 5,8 $kg\ CO_2eq/kWh$ (колонка 2б на фиг. 2.). Общо за отделените емисии от използването на природния га са в границите от 13,6 до 20,3 $kg\ CO_2eq/kWh$. Използването на електрическа енергия през този етап би довело до отделянето на емисии от 4,9 до 97,6 $kg\ CO_2eq/kWh$ (колонка 2в на фиг. 2б). Тези емисии определят и общия диапазон на изменение на отделените въглеродни емисии през този етап на жизнения цикъл.

Третият етап, свързан с производството на елементите на батерията, се отнася до производството на клетъчни и модулни елементи, за които са необходими съответно от 45 до 57 kWh/kWh (колонка 3а на фиг. 2а) и от 11 до 14 kWh/kWh (колонка 3б на фиг. 2а). Съответно през тези два подетапа ще се отделят от 4,6 до 45,6 $kg\ CO_2eq/kWh$ (колонка 3а на фиг. 2б). и от 0,64 до 11,2 $kg\ CO_2eq/kWh$ (колонка 3б на фиг. 2б).

Четвъртият етап, свързан с производството на опаковъчни елементи и сглобяване на батериите се изразходва от 34 до 43 kWh/kWh (колонка 4 на фиг. 2а) електрическа енергия с

емисионен фактор в границата на 0,58 – 0,8 $kg\ CO_2eq/kWh$ и отделят 2 до 34,4 $kg\ CO_2eq/kWh$ (колонка 4 на фиг. 2).

ИЗВОДИ

Въз основа на изследването може да се направят следните изводи:

1. Бързото развитие на електрическите превозни средства изисква разработването на подходящи технологии за рециклиране на отработените литиеви батерии поради редица причини. Във връзка с опазване на околната среда и спестяване на не възобновяеми ресурси, рециклирането на отработените литиеви батерии носи множество ползи.

2. Съвременните методи на рециклиране дават възможност да се регенерират ценните метали от батериите с ефективност по-голяма в повечето случаи над 95%.от

3. Производството на литиевите батерии е свързано с изразходването на енергия в границите от 229 – 338 kWh/kWh , без отчитане етапите за доставка на материали и етапа на рециклиране, за които на сегашния етап е много трудно да се определят съответните параметри. По-ниските стойности се отнасят за предприятия, осигуряващи 100% натоварване на производствените процеси и добра организация при добиването на изходни материали за производството на елементите на батериите.

4. В зависимост от източниците на енергия отделянето на въглеродни емисии може да се движи в интервала от 10,9 до 220,9 $kg\ CO_2eq/kWh$. Ниските стойности на емисиите могат да се реализират ако се използва електрическа енергия от фотоволтаични системи, при които емисионният фактор при производството на електрическа енергия е 0,058 $kg\ CO_2eq/kWh$. Високите стойности са определени при емисионен фактор 0,8 $kg\ CO_2eq/kWh$, което се постига при енергиен микс с преобладаващо производство на електрическа енергия от въглищни електроцентрали.

БЛАГОДАРНОСТИ

Изследванията са финансово подкрепени от договор по ФНИ на Русенски университет "Ангел Кънчев" No 2022-ФТ-03.

ИЗТОЧНИЦИ

Saeed Rahimpour Golroudbary, Daniel Calisaya-Azpilcueta, Andrzej Kraslawski. The Life Cycle of Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Critical Minerals Recycling: Case of Lithium-ion Batteries, ELSEVIER, 26th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference, Procedia CIRP 80 (2019) 316–321.

Han Hao, Zhexuan Mu, Shuhua Jiang, Zongwei Liu and Fuquan Zhao. GHG Emissions from the Production of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles in China. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China, Published: 4 April 2017.

Qiang Dai, Jarod C. Kelly, Linda Gaines and Michael Wang. Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications. Batteries 2019, 5, 48; doi:10.3390/batteries5020048, p. 15.

Yuqing Wang, Ning An, Lei Wen et al. Recent progress on the recycling technology of Li-ion batteries. Elsevier, Journal of Energy Chemistry 55 (2021) 391–419.

Simon Davidsson Kurland. Energy use for GWh-scale lithium-ion battery production. Environ. Res. Commun. 2 (2020) 012001, p. 5.

https://research.chalmers.se/publication/524468/file/524468_Fulltext.pdf

The European Power Sector in 2020. AN ANALYSIS BY Agora Energiewende Anna-Louisa-Karsch-Straße 2 | 10178 Berlin | DE, 202/02-A-2021/EN, Publication date: January 2021.

<https://ember-climate.org/app/uploads/2022/01/European-Power-Sector-in-2020.pdf>