

FRI-2.203-1-TMS-15

---

**LIFE CYCLE ASSESSMENT FOR COMPRESSED AIR AND  
CONVENTIONAL CARS CONCERNING ENERGY CONSUMPTION AND  
CO<sub>2</sub> EMISSIONS<sup>8</sup>**

---

**Assoc. Prof. Ivan Evtimov, PhD**

Department of Engines and Vehicles,  
“Angel Kanchev” University of Ruse  
Phone: 082 888 527  
E-mail: ievtimov@uni-ruse.bg

**Prof. Rosen Ivanov, DSc**

Department of Engines and Vehicles,  
“Angel Kanchev” University of Ruse  
Phone: 082 888 528  
E-mail: rossen@uni-ruse.bg

**Chief assistant Prof. Georgi Kadikyanov, PhD**

Department of Engines and Vehicles,  
“Angel Kanchev” University of Ruse  
Phone: 082 888 526  
E-mail: gkadikyanov@uni-ruse.bg

**Chief assistant Prof. Gergana Staneva, PhD**

Department of Engines and Vehicles,  
“Angel Kanchev” University of Ruse  
Phone: 082 888 526  
E-mail: glstaneva@uni-ruse.bg

***Abstract.** This paper presents an analysis concerning effectiveness of compressed air traction in comparison with conventional cars. The Life Cycle Assessment method, regarding energy spent for extraction the raw materials/sources, manufacturing the components and vehicle, motion, maintenance and repair during exploitation period and the recycling process, is used. The influence of the production technology of the electric energy, needed for charging the battery, is taken into account. On graphics, the energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions for the life cycle of compressed air cars and conventional cars are presented. Examples for Bulgaria and EU countries are given. The main influence on the effectiveness of compressed air cars has the structure of energy mix of the country where the electric car is produced and is used in exploitation.*

***Keywords:** Fuel consumption, Energy consumption, Compressed air cars, Environmental protection*

**ВЪВЕДЕНИЕ**

Болшинството от автомобилите консумират изкопаеми горива, които създават сериозни екологични проблеми – замърсяване на въздуха с CO<sub>2</sub> емисии, фини прахови частици и др. Във връзка с това, редица автомобилни фирми разработват алтернативни по-екологични методи за задвижване на автомобилите. Една от тези алтернативи е използване енергията на предварително сгъстен въздух (Creutzig F., 2010), (Creutzig F., A. Papson, L. Schipper and D. Kammen, 2009), (Dimitrova Zl., Fr. Marechal, 2015), (Dimitrova Zl., Fr. Marechal, 2015), (Kumar S., A. Karthik, 2016), (Papson A., F. Creutzig, and L. Schipper, 2010), (Qihui Yu, Maolin Cai, 2015).

---

<sup>8</sup> Докладът е представен в секция Транспорт и машинознание на 25 октомври 2019 с оригинално заглавие на български език: ОЦЕНЯВАНЕ ЖИЗНЕНИЯ ЦИЛЪЛ НА АВТОМОБИЛИ, ЗАДВИЖВАНИ ОТ СГЪСТЕН ВЪЗДУХ И КОНВЕНЦИОНАЛНИ АВТОМОБИЛИ ОТНОСНО КОНСУМАЦИЯТА НА ЕНЕРГИЯ И CO<sub>2</sub> ЕМИСИИТЕ

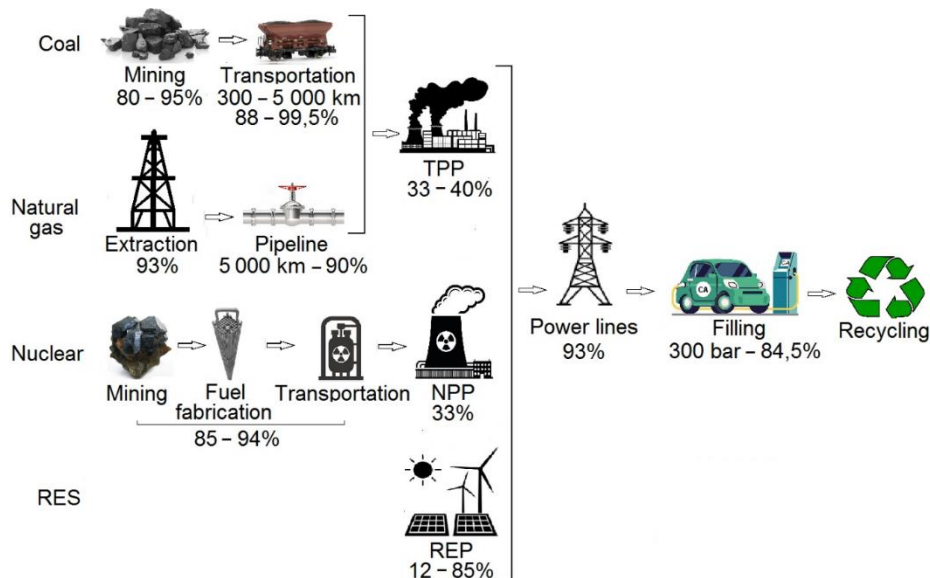
Теоритично, използването на сгъстен въздух като източник на енергия в автомобилите, има някои огромни предимства – той е навсякъде около нас. Но разбира се, нещата в действителност са по-сложни, главно заради необходимостта от енергия за сгъстяване и съхранение на въздуха. Това е основната причина, която ограничава използването им като превозни средства. Използването на енергията на сгъстен въздух отдавна намира различни приложения, но придоби популярност, след като френската компания Motor Development International (MDI), разработи автомобил със сгъстен въздух. Тази популярност се дължи на определени предимства при производството и експлоатацията на такива автомобили, а именно:

- общата им ефективност е почти два пъти по-голяма от автомобилите с двигатели с вътрешно горене (ДВГ) и е възможно да достигне над 70%;
- двигателят, задвижван от сгъстен въздух не се нуждае от особено поддръжане;
- самият процес на преобразуване на енергията може да се използва за охлаждане на купето, което е голямо предимство при експлоатацията им в топлите страни;
- разходите за производство на автомобили, задвижвани от сгъстен въздух са по-малки от тези на конвенционалните автомобили;
- има възможности за регенериране на енергия при закъснително движение или спиране на автомобила;
- хибридните системи с използване енергията на сгъстен въздух са по-евтини, имат по-малка маса от колкото хибридните с акумулаторни батерии. Те позволяват значително да се повиши ефективността от използването енергията на сгъстения въздух в сравнение с тази използвана в автомобилите, задвижвани само от сгъстен въздух.

В тази работа ще се направи оценка на жизнения цикъл на автомобилите, задвижвани от сгъстен въздух и бензиновите автомобили по отношение на използваната енергия и вредните емисии.

## ИЗЛОЖЕНИЕ

Изследването на жизнения цикъл е направено въз основа на посочените във фиг. 1 етапи през целия жизнен цикъл – производство на електрическа енергия със съответните подетапи, пренасяне на електрическата енергия до станциите за сгъстяване на въздуха и зареждането им и рециклиране на автомобилите.



Фиг. 1. Етапи на жизнения цикъл на автомобилите със сгъстен въздух

Тези етапи на жизнения цикъл са сходни с етапите на жизнения цикъл на електромобилите. Разликата се явява в това, че електрическата енергия се използва за сгъстяване на въздуха, а при електромобилите – за зареждане на акумулаторната батерия.

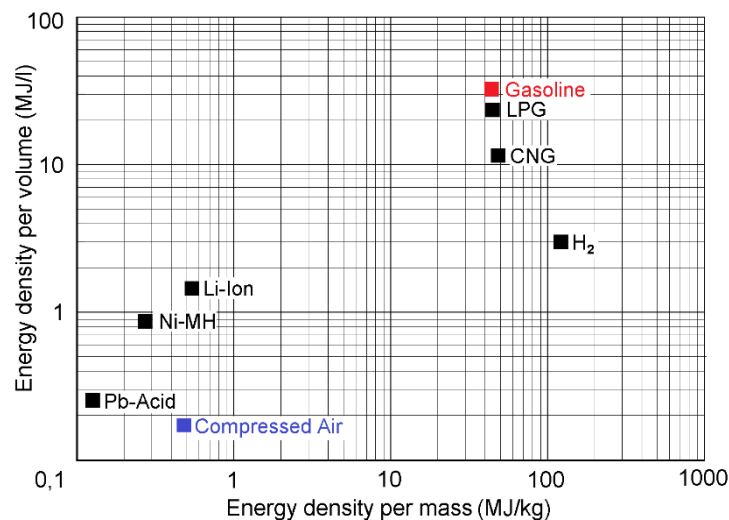
Сгъстеният въздух има най-малко енергийна плътност от всички други източници на енергия в транспортните средства (фиг. 2) (Papson A., F. Creutzig, and L. Schipper, 2010). Спрямо бензина неговата енергийна плътност е близо 200 пъти по-малка, а спрямо природния газ – близо 67 пъти (при едно и също налягане от 300 bar на сгъстения въздух и природния газ). Ако направим сравнение с енергийната плътност на акумулаторните батерии, например литий-йонните, за сгъстения въздух се получава с около 8 пъти по-малка енергийна плътност.

По отношение работата на двигателя, задвижван от сгъстен въздух може да се приеме средна ефективност от 39,7%, което е 8,5% по-малка от максималната възможна (Papson A., F. Creutzig, L. Schipper, 2010).

Съществен момент от жизнения цикъл на тези автомобили е общата ефективност на агрегата за зареждане със сгъстен въздух, според (Papson A., F. Creutzig, and L. Schipper 2010) може да се приеме 53%.

Масата на автомобила със сгъстен въздух е най-малка в сравнение с останалите превозни средства. Това се отразява съществено на консумацията на енергия при експлоатацията им. Тази енергия може да бъде сравнена със съвременните електрически превозни средства, използващи литий-йонни акумулаторни батерии (виж фиг. 2).

Плътността на енергията на системата за сгъстен въздух може да бъде значително увеличена, ако въздухът се нагрява преди разширяване.



Фиг. 2. Сравнение на енергийните характеристики на различните източници на енергия в транспортните средства

При оценката са приети следните условия:

- еднакви маси на бензиновия автомобил (GV) и автомобила със сгъстен въздух;
- еднаква консумация на енергия на BEV – 0,210 kWh/km;
- еднакъв пробег за жизнения цикъл на двата вида превозни средства – 290 000 km;
- еднаква енергия за производство на автомобилите – 11 900 kWh (Aguirre K., L. Eisenhardt, C. Lim, B. Nelson, A. Norring, P. Slowik, N. Tu, 2012);
- ефективност на атомна електроцентрала (АЕЦ) – 29,5% (Eriksson O., 2017);
- ефективност на топлоелектрическа централа (ТЕЦ) с използване на въглища – 26% (Scott A., R. Wedmaier, 2019);
- ефективност на ТЕЦ с използване на природен газ – 40% (Seebregts A., 2010);
- ефективност на водноелектроческа централа (ВЕЦ) – 60% (Real World Hydro Power Calculation, 2019);
- ефективност на вятърната електроцентрала (ВяЕЦ) – 40%;
- средна ефективност на електроцентрали, използващи възобновяеми енергийни източници (ВЕИ) – 50%;

- загуби за транспорт и разпределение на електроенергията – 5% (Bakker D., 2010);
- ефективността при производството на горивото бензин се приема – 79,6% (Palou-Rivera I. et all, 2011);
- емисионните фактори при производството на електрическа енергия за РБългария, Полша, Норвегия и средно за страните от EU-28 са приети съответно стойностите 669, 980, 17 и 447 g/kWh.

### Сгъстяване на въздуха

Нека приемем, че резервоара за съхранение на сгъстения въздух е с обем  $V_2 = 300$  литра и с максимално налягане  $p_2 = 300 \text{ bar}$ . Съгласно уравнение (1) при изотермичен процес, с приетите условия е необходимо да се сгъсти въздух с първоначален обем приблизително  $V_1 = 90\,000$  литра или  $90 \text{ m}^3$  и налягане  $p_1 = 1 \text{ bar}$ . Работата, необходима за реализиране на процеса на сгъстяване е приблизително  $14 \text{ kWh}$  ( $51 \text{ MJ}$ ).

$$E_T = 0,0278 p_1 V_1 \ln \frac{p_2}{p_1}, \text{ kWh} \quad (1)$$

където  $p_1$  е стандартното атмосферно налягане, приблизително равно на  $1 \text{ bar}$ ;

$V_1$  – обемът на сгъствания въздух,  $\text{m}^3$ ;

$p_2$  – максималното налягане на въздуха в резервоара,  $\text{bar}$ ;

На практика реалните процеси се отклоняват от изотермичния процес и най-често протичат по адиабатен процес процес, със степенен показател на политропното сгъстяване  $n = 1,4$ . Изразходваната енергия при този процес е  $55 \text{ kWh}$  ( $198 \text{ MJ}$ ).

$$E_{com} = 0,0278 \frac{p_1 V_1}{n-1} \left[ \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} - 1 \right], \text{ kWh} \quad (2)$$

Въз основа на зависимостите (1) и (2) може да се приеме, че ефективността на процеса е приблизително 26%.

При  $n = 1,2$  изразходваната енергия е приблизително  $27 \text{ kWh}$  ( $96 \text{ MJ}$ ). Ефективността на процеса нараства на 53%.

Дори при високо налягане сгъстеният въздух носи много по-малко енергия от други източници на енергия за задвижване на транспортните средства, включително течни и газообразни горива, както и акумулаторни батерии. Сгъстен въздух съдържа само 0,5% (фиг. 2) от енергията в бензина, 1,5% от енергията на газообразен сгъстен природен газ (CNG) и 6% от енергийната плътност на водорода ( $\text{H}_2$ ). Аналогично, енергийната плътност на сгъстения въздух е по-малка и от тази на различните видове акумулаторни батерии: 67% по-малка енергийна плътност спрямо оловните батерии (Pb-acid); 20% по-малка енергийна плътност спрямо никел-металхидридните батерии (Ni-MH) и само 12% от енергийна плътност на литий-йонни батерии (Li-Ion). Това сравнение е направено въз основа на енергийната плътност на сгъстения въздух, CNG и  $\text{H}_2$  при налягане  $300 \text{ bar}$ .

Математичните модели, с които е определена изразходваната първична енергия за целия жизнен цикъл на превозните средства, са:

- за конвенционалния автомобил;

$$E_{PCV} = \frac{1}{\eta_T} \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{\eta_i} (E_{MV} + E_{PF} + E_{L(E)}), \text{ kWh} \quad (3)$$

- за автомобила със сгъстен въздух;

$$E_{PCAV} = \frac{1}{\eta_T} \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{\eta_i} (E_{MV} + E_C) kWh \quad (4)$$

където  $\alpha_i$  е процентният дял на електрическата енергия, произведена от различните видове електроцентрали, спрямо общо произведената енергия;

$\eta_T$  – к.п.д. при пренос на електрическа енергия;

$\eta_i$  – к.п.д. на електроцентралите, с отчитане цикъла на производство и транспортиране на горивата им;

$E_{MV}$  – енергията, необходима за производство и рециклиране на превозните средства, kWh;

$E_{PF}$  – енергията, необходима за производство на горивото, kWh;

$E_{L(E)}$  – енергията, изгубена вследствие изтичане или изпарение на горивото, kWh;

$E_C$  – енергията, необходима за сгъстяване на въздуха, kWh;

Математичните модели, с които са определени вредните емисии, приведени към въглероден двуокис, са:

– за конвенционалния автомобил;

$$\begin{aligned} CO_{2\ CV} \text{ emissions} &= c E_{MV} + 10^{-2} c (1 - \eta_F) k_F Q L + 10^{-2} c_F k_F Q L = \\ &= c E_{MV} + 10^{-2} k_F Q L [c(1 - \eta_F) + c_F], \text{ kg} \end{aligned} \quad (5)$$

– за автомобила със сгъстен въздух;

$$CO_2 \text{ emissions} = c (E_{MV} + E_C), \text{ kg} \quad (6)$$

където  $c$  е емисионният фактор при производство на електрическа енергия, kg CO<sub>2</sub> / kWh;

$\eta_F$  – к.п.д. при производството на горивото;

$k_F$  – калоричността на горивото, kWh / l;

$Q$  – разходът на гориво, l / 100 km;

$L$  – пробегът на автомобила за жизнения цикъл, km;

$c_F$  – емисионният фактор при изгаряне на горивото, kg CO<sub>2</sub> / kWh;

Резултатите, получени въз основа на (3) – (6) са показани на фиг. 3.

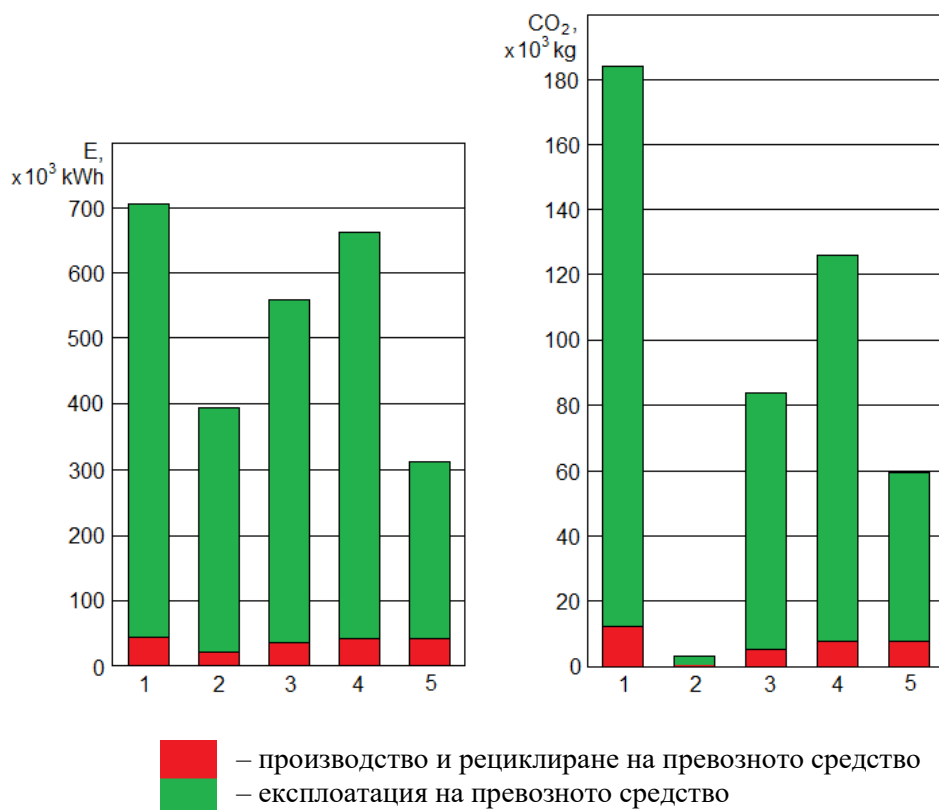
По отношение на първичната енергия, изразходена за целия жизнен цикъл на автомобила със сгъстен въздух, за различните страни е както следва: за България – 664 060 kWh; средно за страните от EU-28 – 559 850 kWh; за Норвегия – 396 540 kWh; за Полша – 700 400 kWh;

По отношение на вредните емисии, приведени към въглероден двуокис за различните страни е както следва: за България – 125 560 kg; средно за страните от EU-28 – 83 860 kg; за Норвегия – 3 190 kg; за Полша – 183 950 kg.

Получените резултати, приведени за 1 km изминат път, са дадени в табл. 1

Таблица 1. Първична енергия и CO<sub>2</sub> емисии за 1 km изминат път

Превозно средство	E, kWh/km	CO <sub>2</sub> , g/km
1	2,42	635
2	1,37	11
3	1,93	289
4	2,29	433
5	1,07	206



Фиг. 3. Първична енергия (а) и въглеродни емисии (б) за жизнения цикъл на автомобил, задвижван със сгъстен въздух и конвенционален бензинов автомобил:  
 1 – Полша; 2 – Норвегия; 3 – средно за страните от EU-28; 4 – България; 5 – конвенционален автомобил, произведен в България

## ИЗВОДИ

Направената оценка по отношение на използваната първична енергия и отделените въглеродни емисии през жизнения цикъл на автомобилите дава нагледна представа за възможностите за използване на енергията на сгъстения въздух като алтернативен начин за задвижване на автомобилите. Ефективността на това задвижване за намаляване на вредното влияние върху околната среда единствено зависи от емисионния фактор при производство на електрическа енергия. За нашата страна, Полша и страните от EU-28, при приетите емисионни фактори и по двата показателя CAV отстъпват пред GV. За Норвегия CAV отстъпват само по използваната първична енергия, която е с 28% по-голяма в сравнение с тази на GV, но по отношение на въглеродните емисии CAV отделят близо 19 пъти по-малко емисии през жизнения си цикъл.

Икономичните и екологичните показатели на различните превозни средства налагат системно търсене на оптимални решения в насока към опазване на околната среда. Резултатите от оценката за жизнения цикъл на CAV като екологични превозни средства показва:

1. Сгъстеният въздух има сравнително ниска енергийна плътност около 50 Wh/l при налягане 300 bar (~30 MPa) и относителна маса 372 g/l. Тази енергийна плътност може значително да се повиши, ако въздухът се нагрява преди разширяване.

2. Основно предимство на CAV е относително малката им маса и екологичното им производство (нямат акумулаторни батерии) в сравнение с електромобилите.

3. Приложимостта на CAV като екологични превозни средства, независими от изкопаемите горива, на този етап от развитието на технологиите се ограничава до използването им само в градски и крайградски условия, основно поради ограничения им пробег.

4. Най-ефективно е използването на енергията на съгъстения въздух при използването съвместно с друг източник на енергия – хибридни технологии, които имат по-добри показатели от тези, използващи енергията, съхранена в акумулаторни батерии.

## REFERENCES

Aguirre Kimberly, Luke Eisenhardt, Christian Lim, Brittany Nelson, Alex Norring, Peter Slowik, Nancy Tu (2012). *Lifecycle Analysis Comparison of a Battery Electric Vehicle and a Conventional Gasoline Vehicle*, p. 33. Available at: <https://www.ioes.ucla.edu/wp-content/uploads/ev-vs-gasoline-cars-practicum-final-report.pdf>

Bakker D. (2010). *Battery Electric Vehicles. Performance, CO<sub>2</sub> emissions, lifecycle costs and advanced battery technology development*. Master thesis Sustainable Development, Energy and Resources, Copernicus institute University of Utrecht, p. 75.

Creutzig Felix (2010). Compressed Air Vehicles. *Article in Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*. DOI: 10.3141/2191-09

Creutzig Felix, Andrew Papson, Lee Schipper and Daniel M. Kammen (2009). *Economic and environmental evaluation of compressed-air cars*. Environ. Res. Lett. 4 044011 (9pp) doi:10.1088/1748-9326/4/4/044011.

Eriksson Ola (2017). *Nuclear Power and Resource Efficiency—A Proposal for a Revised Primary Energy Factor*. Department of Building, Energy and Environmental Engineering, Faculty of Engineering and Sustainable Development, University of Gävle.

Dimitrova Zlatina, Pierre Lourdaïs, François Marecha (2015). Performance and economic optimization of an organic rankine cycle for a gasoline hybrid pneumatic powertrain. *Elsevier Ltd*. All rights reserved, 574-588.

Dimitrova Zl., Fr. Marechal (2015). Gasoline hybrid pneumatic engine for efficient vehicle powertrain Hybridization. *Elsevier Ltd*, 168-177.

Eriksson Ola (2017). *Nuclear Power and Resource Efficiency—A Proposal for a Revised Primary Energy Factor*. Department of Building, Energy and Environmental Engineering, Faculty of Engineering and Sustainable Development, University of Gävle.

Kumar S., A. Karthik (2016). Design and Fabrication of Compressed Air Engine Bike. *Automobile Department, NHCE, Bangalore, India, International Journal of Engineering Science and Computing*, Volume 6, Issue No. 7

Papson Andrew, Felix Creutzig, and Lee Schipper (2010). Compressed Air Vehicles. Drive-Cycle Analysis of Vehicle Performance, *Environmental Impacts, and Economic Costs*, DOI: 10.3141/2191-09, 67-74.

Palou-Rivera I. et all (2011). Updates to Petroleum Refining and Upstream Emissions. *Center for Transportation Research Argonne National Laboratory, CTR/Argonne*, p. 12.

Qihui Yu, Maolin Cai (2015). Experimental Analysis of a Compressed Air Engine, School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing, China.

Real World Hydro Power Calculation (2019). The Renewable Energy Website. <http://www.reuk.co.uk/wordpress/hydro/calculation-of-hydro-power/>

Scott A., R. Wedmaier (2019). The Assessment and Control of Coal Damage and Loss. Project Number C3017 University of Queensland. Available at: [www.acarp.com.au/abstracts.aspx?repId=C3017](http://www.acarp.com.au/abstracts.aspx?repId=C3017)

Seebregts A (2010). Steam-gas power stations). Energy technology systems analysis programme.

Wang M. (2008). *Estimation of Energy Efficiencies of U.S. Petroleum Refineries*. Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory

Изследванията са подпомогнати и финансирани от ФНИ на РУ „Ангел Кънчев“ Проект – 2019-ФТ-01 „Изследване на съвременните технологии за намаляване вредните емисии от автомобилите“.