Механика Транспорт Комуникации

ISSN 1312-3823 (print)
ISSN 2367-6620 (online)
том 23, брой 3, 2025 г.

Научно списание **http://www.mtc-aj.com** **статия № 2698**

ИЗГРАЖДАНЕ НА ВЕРИГАТА НА ДОСТАВКИ НА ВОДОРОД

Васил Василев
vassco@abv.bg

Висше транспортно училище „Тодор Каблешков",
ул. „Гео Милев" 158, София 1574,
БЪЛГАРИЯ

***Резюме**: Конвенционалните изкопаеми горива, като нефта и природния газ са евтин и доказан източник на енергия. Те обаче имат определен лимит и в недалечно бъдеще могат да бъдат изчерпани. По тази причина от сега се обръща внимание на алтернативни горива, като електрическа енергия и зелен водород, който е широко признат бъдещ енергиен носител поради своите незамърсяващи свойства и висока енергийна плътност. За да се реализира водородна мобилност в бъдеще, от съществено значение е да се изгради цялостна верига за доставка на зелен водород, която може да го превърне в ключов енергиен носител за превозните средства. В този доклад правим опит да създадем вариант на веригата за доставки на зелен водород в Европа и в България, включваща технологии съхранение, транспорт и използване. Климатът в Европа не благоприятства работата на възобновяемите енергийни източници (ВЕИ) за производство на електрическа енергия. Това предполага, че голяма част от нужния за континента екологичен водород – бил той зелен или бял (добит по естествен начин в природата) ще се внася. Представен е базов модел на верига на доставки на европейския континент. Изграден е модел за транспортирането на водород от входните за България пристанища до местата с евентуално потребление в различни точки на България. Обсъждат се предизвикателствата при изграждането на верига за доставки на водород от технико-икономическа гледна точка и перспективите за бъдещото ѝ развитие.*

***Ключови думи:** зелен водород, бял водород, веригата за доставка на водород, мобилност, базирана на водород, търсене на водород*

ВЪВЕДЕНИЕ

Надеждите, които се възлагат на зеления водород, като източник на чиста енергия за мобилността нараснаха много, особено след започването на войната в Украйна, когато цената на природния газ скочи до облаците. Предполага се, че използването на зелен водород, като гориво за превозните средства не само може да подобри устойчивостта и надеждността на енергийната система, но също така да я направи по-гъвкава [2].

В стратегията на ЕС за развитие на производството на водород най-много се набляга на т.нар. „зелен" водород. Той се получава чрез електролиза на вода при използване на възобновяема енергия – от фотоволтаици, от вятърни паркове, геотермална, хидроенергия (ВЕЦ) и от биомаса [1]. За съжаление много малка част от произведения водород може да се определи като „зелен". До момента огромната част от водорода, нужен в определени производства (химически заводи и петролни рафинерии) се произвежда чрез реформинг на природен газ на място [3]. Това е процес, който е свързан с отделяне на вредни емисии. Търсенето на зелен водород не е голямо, поради високата му цена и неразвитата инфраструктура за неговите доставки [4]. Като цяло недостатъчността на настоящата инфраструктура на веригата за доставки на водород за зареждане на превозните средства се счита за една от пречките за стимулиране на водородната мобилност. Очаква се цената да падне след появата на повече производители и изграждане на инфраструктура за доставките на зелен водород [5].

Друга потенциална причина да се залага на водородната мобилност е намирането на значителни залежи на естествен (бял) водород в някои страни, които дават надежди за значително поевтиняване на това алтернативно гориво.

ОПИСАНИЕ НА ПРОБЛЕМА

Проектирането на веригата за доставки (Hydrogen supply chain network design - HSCND) е един от най-важните проблеми за решаване при планирането на изграждането на водородната инфраструктура. При изграждане на една такава логистична верига, подобно на моделите за дизайн на верига за доставка са необходими е необходимо да има сигурни източни на редовни доставки на зелен или бял водород.

Често производството на зелен водород се разглежда като начин за консервиране на електрическа енергия от фотоволтаични ВЕИ през лятото, период на обилно слънцегреене, когато пазарните цени на произведената от тях енергия падат под себестойност. Т.е концепцията е, че водородът, необходим за цялата година, ще се произвежда през летните месеци. Това налага изграждането на големи резервоари за съхранение на водород. И тук възниква един друг проблем - в момента дълготрайното съхранение на водород в течна или газообразна форма е скъп и неефективен процес [6]. А за изграждането на една устойчива система на водородна мобилност се изискват навременни и постоянни доставки на гориво. Това налага да се търсят други начин за осигуряване на надеждни и бързи доставки на зелен водород.

В тази насока, европейския континент не е особено подходящо място за производство на електроенергия от ФЕЦ. Според данните за произведената в България соларна енергия през 2023 г. (източник European Network of Transmission System Operators for Electricity – ENTSO-E) най-много е произведена през август – 429 GW, а най-малко през януари 59 GW. Ако приемем, че производството през август инсталациите са работили със 100% от капацитета си, то през януари те са работили с 13,7% от капацитета си. Средно се получава, че през годината ФЕЦ в България работят с 60% от максималната си мощност. Това е при положение, че страната ни е в южната част на Европа. От тук се налага изводът, че Европа няма как да разчита само на собствени мощности, ако иска да задоволи нуждите от зелен водород в ЕС, произведен с електричество от ФЕЦ.

Като потенциални места за изграждане на заводи за производство на зелен водород се очертават Северна Африка [7] и Близкия Изток - места с висок интензитет на слънчевата светлина. Това би осигурило работа на ФЕЦ с почти 100% натоварване. По отношение на местоположението, препоръчително е заводите да бъдат разположени близо до морския бряг, като при електролизата се използва дестилирана вода от морето. Това ще доведе до допълнителни разходи за обезсоляване, но пък водата е в изобилие. Тук може да се използва новаторския подход за електролиза на водни пари, които се получават при дестилиране [8], като това би спестило процеса на втечняване при дестилирането.

Всичко това налага да се изгради една верига на доставки на водород от производители, които са извън европейския континент до държавите в Европа.

ИЗГРАЖДАНЕ НА ВЕРИГА НА ДОСТАВКИ

Примерна верига на доставки на зелен водород е показана на фиг. 1. Производствените мощности са базирани в Африка или Близкия Изток в близост до пристанища. Това ще позволи на водорода да бъде доставян чрез кораби. Подходящи за използване са танкерите за пренос на втечнен водород до европейските терминали [9]. Все още тези кораби не са много, но при повишено търсене на техните услуги броят им ще се увеличи. Водородът може да се доставя до европейските брегове и в компресирано състояние, но количествата там са по-малки и няма да бъде толкова рентабилно. Също така, водородът може да бъде превозван още и под формата на амоняк (NH3) [6], който е лесен за втечняване и има висока плътност на водорода. Друг вариант е за превозване на водорода е под формата на други течни органични водородни носители (LOHC - Liquid Organic Hydrogen Carriers)[10]. В тях той се свързва с органични съединения (примерно толуол) и се освобождава при нужда.

Следващото звено във веригата за доставки са европейските терминали, на които ще се разтоварва втечнения водород (или амонякът) и ще се привежда в газообразно състояние. Като за начало може местата им да съвпадат с тези на терминалите за втечнен природен газ, тъй като

най-удачно е доставките на водород на по-големи разстояния да стават по тръбопроводи. Тъй като инвестицията за изграждане на специализирана мрежа от тръбопроводи за пренос на водород е доста голяма, като за начало се разработват варианти водородът да се пренася заедно с природния газ [11]. При този метод на транспорт разделянето на двата газа ще става в централните хъбове на отделните страни, през които минава тръбопровода.

Фиг. 1.

От там чрез камиони (цистерна или tube trailer) или по малки местни тръбопроводи, водородът ще се транспортира в газообразно състояние под налягане до няколко локални хъба, от които ще бъде транспортиран до станциите за зареждане на крайните клиенти. Дали има нужда от изграждането на локални тръбопроводи ще зависи от търсенето на водород в близкото бъдеще.

ПЪТЯТ НА ВОДОРОДА В БЪЛГАРИЯ

Условно, може да очертаем няколко етапа за навлизането на водородната мобилност в България [1]:

I етап – Заменяне на част от автобусите в обществения градски транспорт с водородни електробуси. Това може да стане само с активното финансиране от фондовете на ЕС и държавния бюджет.

II етап – Подпомагане на частните превозвачи чрез различни финансови инструменти за закупуване на водородни електробуси за превози на къси, а след това и на дълги разстояния. Въвеждане на водородни влакове по къси маршрути (примерно теснолинейката (Септември – Добринище).

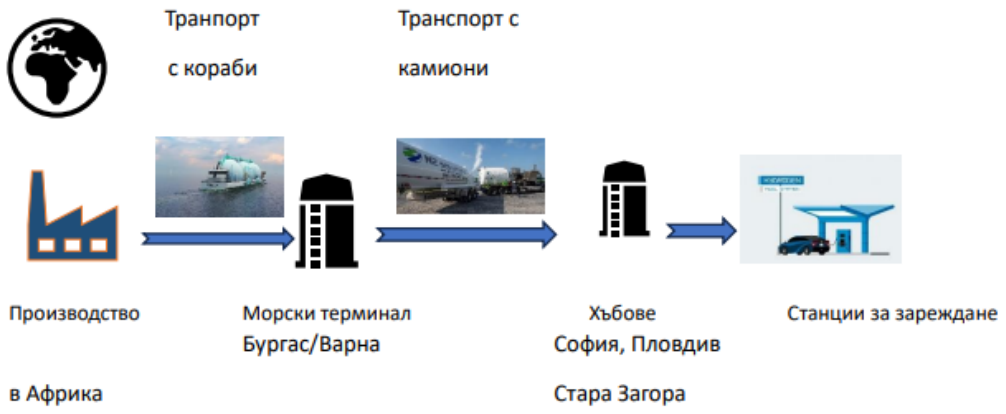
III етап – Стимулиране на граждани и частни фирми за закупуването на водородни електромобили за бизнес или за лични нужди.

Каквото и да говорим за навлизането на водорода в мобилността, трябва да имаме в предвид едно нещо – няма как да пристъпим към нито един етап, ако няма изградена инфраструктура на веригата на доставки на зелен водород. Т.е. в началото трябва да се изгради оптимална инфраструктура, която да осигури необходимото зареждане на пилотните проекти. След това, с разширяването на съществуващата инфраструктура ще може да се пристъпи към осъществяването на следващите проекти за водородна мобилност.

Както вече посочихме, първоначалният етап на навлизане на водородната мобилност е свързан със заменянето на част от автобусите в градския транспорт с водородни електробуси. В България няколко са големите градове, в които може да се осъществи първоначално този процес – София, Пловдив, Варна, Бургас, Стара Загора и Русе. По-късно, към тях може да се присъединят и други градове като Велико Търново, Плевен, Шумен, Сливен, Хасково и др.

Примерна схема за верига на доставки на зелен водород е представена на фиг. 2, като за входни точки са посочени пристанищата в Бургас и Варна. Не трябва да пренебрегваме и

конкуренцията на гръцките пристанища, които са по-близо до нас, като Солун и Александруполис.



Фиг. 2.

За предпочитане е съхранението на водород в базовите депа да бъде в газообразна форма, а не втечнен – LH_2, тъй като в схемата се разчита на редовни доставки от пристанищата. Складови бази за съхранение на водород в течна форма могат да се изградят на пристанищата, които ще са входните точки за достъп на водород в България.

Във всеки един от градовете, в които ще се въведат водородни автобуси ще трябва да се изгради терминал за съхранение на газообразния водород, заедно със станции за зареждане към тях. Препоръчително е самото депо за водородни автобуси да бъде там.

При преминаване към по-горните етапи на навлизане на водородната мобилност може да се изгради тръбопроводна мрежа за доставки на газообразен водород. Наскоро Гърция обяви търг за идеен проект за изграждане на мрежа от тръбопроводи за водород, която ще продължава към България. Като отправно пристанище за доставки на водород, който ще върви по тръбопроводите за България и нагоре се спряга Александруполис. Тогава схемата на доставки ще се промени, в зависимост от градовете, през които ще преминава тръбопроводната мрежа за водород в България. Една по-развита тръбопроводна мрежа би елиминирала доставките на по-големи разстояния на газообразен водород с камиони с ремарке тип tube trailer. Те ще се използват предимно за вътрешноградско зареждане и за по-къси разстояния около големите градове.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Навлизането на водородната мобилност изисква изграждането на устойчива и развита верига на доставки на алтернативното гориво. Не може да очакваме увеличаване на броя на водородни транспортни средства, ако няма развита мрежа за ритмични доставки за постоянно и непрекъснато зареждане със синьото гориво. Европейският континент не е подходящ от климатична гледна точка за равномерно производство на зелен водород и трябва да се търсят други източници от страни с по-продължително слънцегреене, като в Европа и Близкия Изток. Транспортът им до морските терминали на Европа ще става със специализирани танкери и под различни форми, а в самия континент водородът, на първо време, ще може да ползва тръбопроводите за природен газ.

ЛИТЕРАТУРА:

[1] Водородно бъдеще за България – Национална пътна карта за подобряване на условията за разгръщане на потенциала за развитие на водородните технологии и механизмите за производство и доставка на водород, https://www.mig.government.bg
[2] Fabian Stöckl1, Wolf Peter Schill1, Alexander Zerrahn, Optimal supply chains and power sector benefits of green hydrogen, www.nature.com/scientificreports, 2021
[3] Joakim Andersson, Stefan Grönkvist, Large-scale storage of hydrogen, International Journal of Hydrogen Energy, April 2019
[4] Lei Lia, Herve Manier, Marie-Ange Manier, Hydrogen supply chain network design: An optimization-oriented review, Renewable & Sustainable Energy Reviews, november.2018
[5] Evangelos E. Pompodakis, Arif Ahmed, Constantinos Condaxakis,
Georgios I. Orfanoudakis, Emmanuel S. Karapidakis, Paving the way toward hydrogen mobility: An effective policy to reduce the green hydrogen cost, International Journal of Hydrogen Energy 100 (2025)
[6] Mohammad Reza Rahimpour, Mohammad Amin Makarem, Parvin Kiani, Hydrogen Transportation and Storage, CRC Press, First edition published 2025
[7] Piotr Komorowski, Marta Grzywacz, Green hydrogen in Africa:
opportunities and limitations, Journal of Management and Financial Sciences, Issue 50, July 2024
[8] Mohammad reza Hashemi, Hydrogen from mist, November 2024
https://www.researchgate.net/publication/385980008_HYDROGEN_FROM_MIST
[9] Rafael d'Amore-Domenech, Vladimir L. Meca, Bruno G. Pollet, T.J. Leo, On the bulk transport of green hydrogen at sea: Comparison between submarine pipeline and compressed and liquefied transport by ship, Energy journal, March 2023
[10] Tianqing Huo, Tianyu Feng, Fusheng Yang, ZaoXiao Zhang, Transforming Hydrogen Supply at Hydrogen Refueling Stations: Design and Analysis of LOHC for Auxiliary Hydrogen Supply, Conference paper: SAE 2024 Vehicle Powertrain Diversification Technology Forum, January 2025
[11] Weiqing Xu, Yongwei An, Shuangjie Yan, Rui Li, Maolin Cai, Guanwei JiaID, Simulation study on hydrogen concentration distribution in hydrogen blended natural gas transportation pipeline, PLOS ONE, December 3, 2024

BUILDING A HYDROGEN SUPPLY CHAIN

Vasil Vassilev
vassco@abv.bg

Todor Kableshkov University of Transport,
Sofia, Geo Milev Str. 158,
BULGARIA

Abstract: *Conventional fossil fuels, such as oil and natural gas, are a cheap and proven source of energy. However, they have a certain limit and may be exhausted in the near future. For this reason, attention is now being paid to alternative fuels, such as electricity and green hydrogen, which is a widely recognized future energy carrier due to its non-polluting properties and high energy density. In order to realize hydrogen mobility in the future, it is essential to build a complete green hydrogen supply chain that can turn it into a key energy carrier for vehicles. In this report, we attempt to create a variant of the green hydrogen supply chain in Europe and Bulgaria, including storage, transportation and utilization technologies. The climate in Europe is not conducive to the operation of renewable energy sources (RES) for the production of electricity. This suggests that a large part of the ecological hydrogen needed for the continent – be it green or white (naturally obtained in nature) – will be imported. A basic model of a supply chain on the European continent is presented. A model is built for the transportation of hydrogen from the ports of entry to Bulgaria to the places of possible consumption in different parts of Bulgaria. The challenges in building a hydrogen supply chain from a technical and economic point of view and the prospects for its future development are discussed.*

Key words: *green hydrogen, white hydrogen, hydrogen supply chain, hydrogen-based mobility, hydrogen demand*