

V) UTILIZAREA HIDROGENULUI

V. 11.1. INTRODUCERE

Hidrogenul poate fi utilizat pentru propulsia autovehiculelor fie drept combustibil pentru motorul cu ardere internă, fie pentru alimentarea pilelor de combustibil care furnizează energia electrică necesară alimentării motoarelor care asigură tracțiunea.

Utilizarea hidrogenului pentru pilele de combustibil este justificată de randamentul ridicat al acestora – peste 60%, comparativ cu maximum 45% pentru motorul cu aprindere prin comprimare (Pistidda, 2021). Dacă se ține cont de randamentul motorului termic și de randamentul transmisiei, utilizarea hidrogenului pentru alimentarea motoarelor cu ardere internă are avantajul de mări randamentul total până la valori de aprox. 40-50% (față de 30-35% la utilizarea combustibililor clasici), valori comparabile cu cele obținute de vehiculele ce utilizează pile de combustibil și tracțiunea electrică (Wrobel, Wrobel, Tokarz, Lach, & Podsadni, 2022), ceea ce justifică interesul pentru motoarele cu ardere internă alimentate cu hidrogen. În plus, utilizarea hidrogenului pentru alimentarea motoarelor cu ardere internă se justifică și din punct de vedere puterii calorice inferioare - 120 MJ/kg pentru hidrogen (Nour, Awad, Yusup, & Sufian, 2010), față de 44,5 MJ/kg pentru benzină (Farias, și alții, 2022) – cât și din punct de vedere al emisiilor poluante (arderea hidrogenului produce, teoretic, doar apă), asigurând astfel protejarea mediului. Cu toate acestea trebuie remarcat faptul că utilizarea hidrogenului poate avea drept consecință creșterea emisiilor de NO_x, tendință care poate fi însă contracarată prin recircularea gazelor de ardere (Exhaust Gas Recirculation – EGR) (Wrobel, Wrobel, Tokarz, Lach, & Podsadni, 2022).

Indiferent de modul în care se utilizează hidrogenul pentru propulsia autovehiculelor, faptul că acesta poate fi obținut dintr-o mare diversitate de surse îi conferă un indiscutabil avantaj în comparație cu alți combustibili (Gurz, Baltacioglu, Hames, & Kaya, 2017).

Referindu-ne la utilizarea hidrogenului pentru alimentarea pilelor de combustibil, trebuie remarcat că, raportat la greutatea sistemului de stocare, hidrogenul are avantaje legate de cantitatea de energie disponibilă pe unitatea de masă a sistemului de stocare: 550Wh/kg pentru hidrogen, față de 150 Wh/kg pentru bateriile utilizate la obținerea curentului electric (Rivard, Trudeau, & Zaghib, 2019).

Una din principalele probleme puse de utilizarea hidrogenului o constituie densitatea energetică volumetrică redusă a acestuia – 0,013 MJ/m³ - din cauza densității reduse a acestuia în condiții normale de presiune și temperatură (0,0899 kg/m³) (Farias, și alții, 2022). Ca urmare, stocarea hidrogenului la bordul autovehiculului, într-o cantitate suficientă pentru a asigura o autonomie comparabilă cu dată de combustibilii clasici, reprezintă o adevărată provocare, indiferent dacă acesta se utilizează pentru alimentarea motorului termic sau pentru obținerea energiei electrice.

V. 11.2. STOCAREA HIDROGENULUI

După cum s-a arătat anterior, densitatea redusă a hidrogenului face dificilă stocarea acestuia în cantități care să asigure o autonomie corespunzătoare a autovehiculului respectiv. Dificultatea rezolvării acestei probleme a făcut ca, de exemplu, Departamentul Energiei din Statele Unite să-și modifice țintele referitoare la stocarea hidrogenului: de la valoarea inițial propusă pentru a fi atinsă în anul 2010 de 6,5% din greutatea sistemului de stocare (respectiv 45 kg H₂/m³) pentru anul 2010, în 2015 s-a ajuns la 5,5% din greutatea sistemului de stocare (respectiv 40 kg H₂/m³) (Froudakis, 2011); tabelul 11.1 prezintă valori ale țintelor referitoare la stocarea hidrogenului, stabilite la nivelul anului 2017⁵⁹.

Tabelul 11.1

Valori țintă pentru capacitatea sistemelor de stocare a hidrogenului

Mărimea	Anul 2020	Anul 2025	Ținta finală
% din greutatea sistemului de stocare	4,5	5,5	6,5
kg H ₂ /m ³ sistem de stocare	30	40	50

În prezent sunt avute în vedere patru metode de bază pentru stocarea hidrogenului:

- în stare gazoasă, la presiune ridicată;
- în stare lichidă, în rezervoare criogenice;
- sub formă de hidruri metalice;
- în nanotuburi și alte materiale pe bază de carbon.

V.11.2.1. Stocarea H₂ în stare gazoasă

Stocarea gazelor în recipiente, sub presiune, este o tehnologie suficient de bine dezvoltată, fiind utilizată pentru nenumărate tipuri de gaze sub presiune.

La ora actuală pentru stocarea hidrogenului se utilizează patru tipuri de rezervoare⁶⁰ (fig. 11.1):

- butelii de tip I, realizate din oțel;
- butelii de tip II, din metal (oțel sau aluminiu) cu grosime mai mică decât la butelii de tip I, prevăzute la exterior cu o armătură din fibre și materiale compozite pentru creșterea rezistenței mecanice;
- butelii de tip III, la care metalul este folosit doar pentru asigurarea etanșeității, rezistența mecanică fiind asigurată de armătura din fibre și materiale compozite care îmbracă complet recipientul;
- butelii de tip IV, la care recipientul etanș este realizat dintr-un polimer îmbrăcat în armătura care asigură rezistența mecanică.

Utilizarea buteliilor din oțel, în care hidrogenul este stocat la presiuni de ordinul a 150-300 bar, conduce la o capacitate de stocare de aproximativ 1% din

⁵⁹https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/05/f34/fcto_targets_onboard_hydro_storage_explanation.pdf

⁶⁰ <https://hyfindr.com/hydrogen-tank/>

greutatea sistemului, atât din cauza densității mici a hidrogenului în comparație cu alte gaze - $0,08 \text{ kg/m}^3$, față de $0,65 \text{ kg/m}^3$ pentru metan (Fayaz, și alții, 2012) -, cât și din cauza greutateii buteliei. În plus, hidrogenul are un efect de fragilizare a oțelului, astfel încât rezistența mecanică a materialului buteliei se reduce în timp. Ca urmare, buteliile de tip I nu sunt utilizate pentru stocarea hidrogenului în autovehicule.

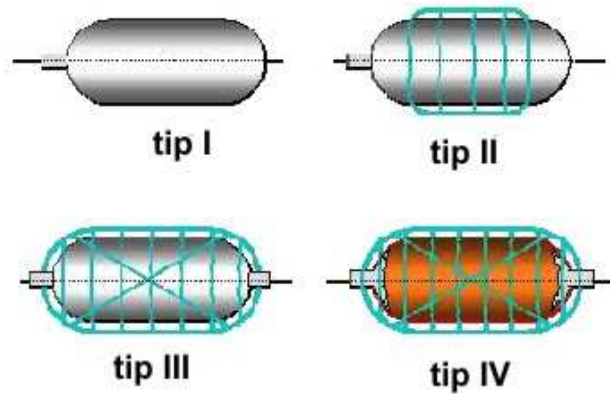


Fig. 11.1. Tipuri de butelii pentru stocarea hidrogenului⁶¹

Utilizarea aluminiului pentru buteliile de tip II și III nu pune probleme specifice în cazul stocării hidrogenului, permițând o ușoară îmbunătățire a raportului dintre greutatea hidrogenului stocat și greutatea buteliei (până la 1,5%).

Buteliile de tip IV asigură stocarea hidrogenului la presiuni de până la 700 bar, iar greutatea acestora poate fi cu până la 70% mai mică decât greutatea buteliilor de tip I. Principala problemă care apare în acest caz o reprezintă permeabilitatea față de hidrogen polimerului care asigură etanșeitarea (din cauza dimensiunilor mici moleculelele de hidrogen difuzează prin învelișul care asigură etanșeitarea). Din această cauză incinta etanșă se realizează din polimeri de înaltă densitate de tipul polietilenei și poliamidei, în timp ce armătura care asigură rezistența mecanică este realizată din fibre de aramide, sticlă sau carbon (fig. 11.2); pentru presiuni de stocare cuprinse între 350 și 700 bar se utilizează armături pe bază de fibre de carbon.

Având în vedere cele prezentate mai sus, tendința generală este de utilizare a buteliilor de tip III și IV pentru stocarea hidrogenului la bordul autovehiculelor; pentru buteliile de tip III raportul dintre greutatea hidrogenului stocat și greutatea buteliei ajunge la 4,2%, iar pentru buteliile de tip IV până la 5,7% (Rivard, Trudeau, & Zaghbi, 2019). Nu poate fi însă neglijat costul crescut al acestor tipuri de butelii, care poate ajunge până la 600-700 \$/kg, față de 80-90 \$/kg pentru buteliile de tip I sau II.

⁶¹ <https://h2tools.org/bibliography/hydrogen-storage-industrial-perspectives>

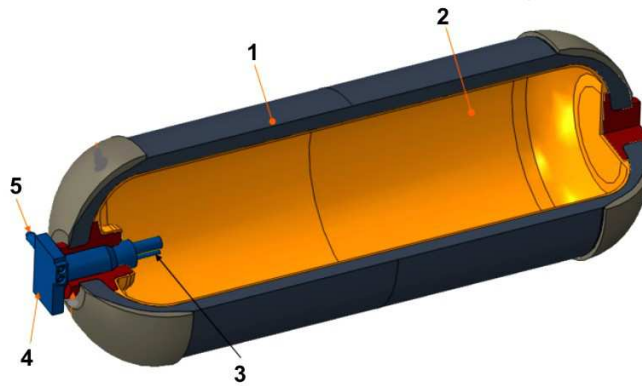


Fig. 11.1. **Tanc din fibre de carbon pentru stocarea hidrogenului sub presiune**
(Rivard, Trudeau, & Zaghbi, 2019)

1-material compozit cu fibre de carbon; 2-manta de etanșare din polimer; 3-senzor de temperatură; 4-supapă; 5-supapă de siguranță.

V.11.2.2. Stocarea H₂ în stare lichidă

În stare lichidă, la presiune atmosferică, hidrogenul are o densitate de 70 kg/m³ (Andersson & Gronkvist, 2019), ceea ce asigură o autonomie mult mai mare a autovehiculului în comparație cu varianta stocării în stare gazoasă. Din fig. 11.2 se observă că, chiar și în acest caz, densitatea energetică volumetrică a hidrogenului este aproximativ un sfert din cea a combustibililor clasici.

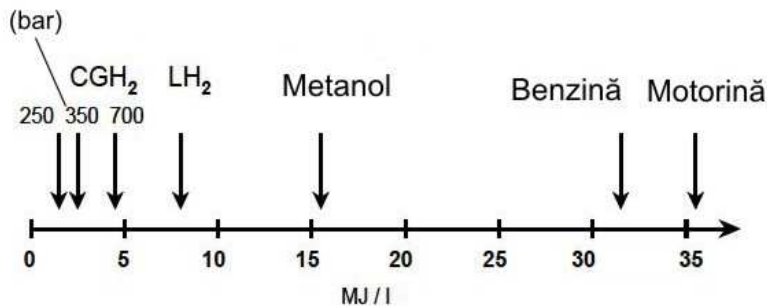


Fig. 11.2 **Densitatea energetică volumetrică a unor combustibili** (Arnold & Volf, 2005)
CGH₂ – hidrogen în stare gazoasă, la diferite presiuni; LH₂-hidrogen în stare lichidă

Principala problemă care apare în acest caz este legată de temperatura foarte joasă la care hidrogenul există în stare lichidă: - 253°C la presiune atmosferică. Ca urmare, tancul în care se află hidrogenul trebuie să fie foarte bine izolat termic; chiar și în acest caz, pierderile de gaz prin evaporare pot fi cuprinse între 0,1 și 1% pe zi (Andersson & Gronkvist, 2019), în funcție de soluția constructivă utilizată. În plus, trebuie avut în vedere și consumul de energie pentru

lichefiere, care poate ajunge la 30% din energia obținută prin arderea hidrogenului (Ross, 2009).

Tancurile utilizate pentru stocarea hidrogenului în stare lichidă sunt de tip Dewar, cu pereți dubli (1, 2, fig. 13.1) între care se află vacuum și un sistem de izolare termică (9), prevăzute cu o supapă de siguranță (4) pentru evacuarea în atmosferă a hidrogenului gazos format prin evaporare și pentru a se evita creșterea presiunii în interiorul rezervorului.

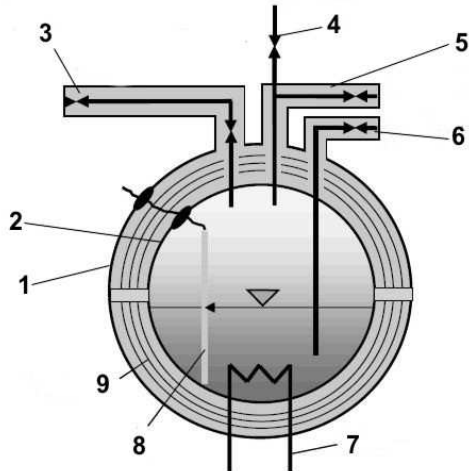


Fig. 11.3. Rezervor pentru stocarea hidrogenului lichid (Arnold & Volf, 2005)

- 1-perețe exterior;
- 2-perețe interior;
- 3-racord alimentare cu H₂ lichid;
- 4-supapă de siguranță;
- 5-racord evacuare H₂ gazos;
- 6-racord preluare H₂ lichid;
- 7-rezistență de încălzire;
- 8-senzor de nivel;
- 9-izolație termică

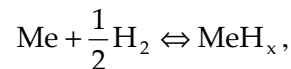
Ținând cont construcția rezervorului criogenic pentru hidrogen se apreciază că greutatea hidrogenului stocat astfel poate ajunge la 10% din greutatea sistemului de stocare.

Există și soluții combinate de stocare a hidrogenului, atât sub formă de gaz cât și sub formă de lichid (fig. 11.4), caz în care tancul trebuie să asigure atât izolarea termică cât și rezistența mecanică impusă de presiunea din interior, care poate atinge valori de 200-300 bar. În acest caz raportul dintre greutatea hidrogenului stocat și cea a sistemului de stocare poate atinge valori cuprinse între 5,4% și 7,4% (Ahluwalia, și alții, 2009; Rivard, Trudeau, & Zaghbi, 2019)

V.11.2.3. Stocarea H₂ în hidruri metalice

Obținerea unor densități energetice volumetrice mai mari decât în cazul stocării hidrogenului în stare lichidă sau gazoasă este posibilă prin stocarea/absorbția acestuia în structura unor materiale.

Una dintre metodele cele mai simple și care a fost studiată în amănunt o reprezintă stocarea atomilor de hidrogenului în structura cristalină a unor aliaje metalice, cu formarea de hidruri metalice conform baza reacției generale (Yang, Sudik, Wolverton, & Siegel, 2010):



în care Me reprezintă un aliaj metalic.

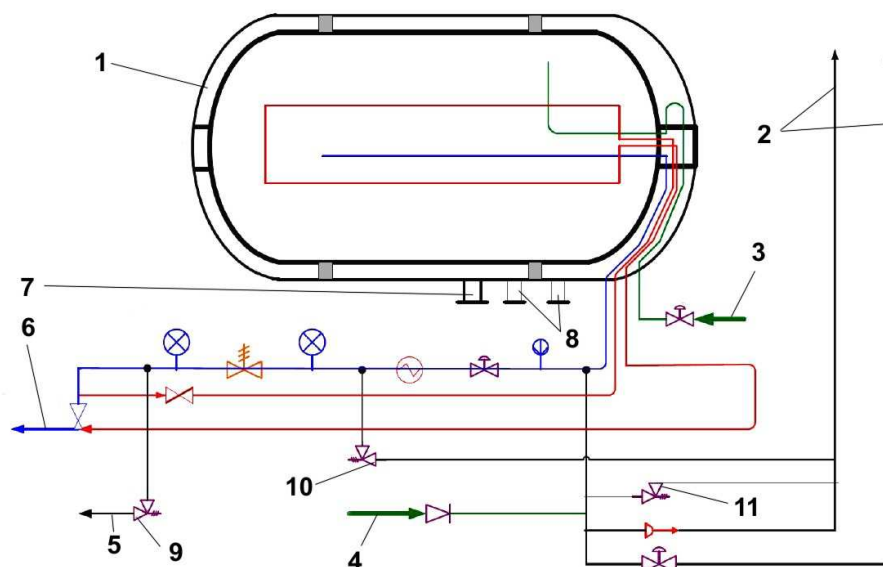


Fig. 11.4. Rezervor pentru stocarea sub presiune a hidrogenului lichid și gazos
(Rivard, Trudeau, & Zaghib, 2019)

1-spațiu vidat; 2, 5-racorduri de descărcare; 3-racord de umplere cu H₂ lichid; 4- racord de umplere cu H₂ gazos; 6-racord alimentare motor; 7-racord pompă de vacuum; 8-racorduri supape de siguranță vacuum; 9, 10, 11-supape de siguranță.

Ca exemple de hidruri metalice pentru stocarea hidrogenului se pot menționa hidrura de lantanu-nichel (LaNi₅H₆), de alant de sodiu (NaAlH₄), de magneziu (MgH₂) (Ross, 2009; Yang, Sudik, Wolverton, & Siegel, 2010).

Reacția de formare a hidrurii prin absorbția hidrogenului este exotermă și are loc la presiuni de 1-10 bar, în timp ce eliberarea hidrogenului (desorbția) are loc cu aport de căldură din exterior; pentru hidrura de magneziu, de exemplu, desorbția are loc la aprox. 290°C și o presiune de 1 bar (Yang, Sudik, Wolverton, & Siegel, 2010). Pentru sectorul de transporturi este de dorit ca temperatura la care are loc desorbția hidrogenului să fie sub 120°C, la presiuni cuprinse între 1 și 10 bar (Pistidda, 2021).

În scopul creșterii cantității de hidrogen stocat și a creării unor condiții favorabile de utilizare, s-au făcut cercetări referitoare la utilizarea unor hidruri intermetalice de tip A₂B, AB, AB₂ și AB₅; tabelul 11.2 câteva exemple de hidruri intermetalice.

Pentru sectorul de transporturi, cele mai promițătoare par a fi hidrurile de tip AB₂ bazate pe TiMn₂; acestea pot atinge capacități de stocare de până la 2% (Lototsky, Tolj, Klocho, & et al., 2020; Dematteis, Barale, Corno, Sciuillo, & Baricco, 2021).

Pentru o altă categorie de hidruri, borohidrurile (KBH₄, LiBH₄),

capacitatea teoretică de stocare poate atinge valori cuprinse între 7,5% și 18,5%, dar prezintă unele dezavantaje legate de reversibilitatea procesului de absorbție a hidrogenului (Dematteis, Barale, Corno, Sciullo, & Baricco, 2021).

Tabelul 11.2

Hidruuri intermetalice pentru stocarea hidrogenului (Dematteis, Barale, Corno, Sciullo, & Baricco, 2021)

Tip	Element A	Element B	Compoziție
A2B	Mg, Zr	Ni, Fe, Co	Mg ₃ Ni, Mg ₂ Co, Zr ₂ Fe
AB	Ti, Zr	Ni, Fe	TiNi, TiFe, ZrNi
AB ₂	Zr, Ti, Y, La	V, Cr, Mn, Fe, Ni	LaNi ₂ , YNi ₂ , YMn ₂ , ZrCr ₂ , ZrMn ₂ , ZrV ₂ , TiMn ₂
AB ₃	La, Y, Mg	Ni, Co	LaCo ₃ , YNi ₃ , LaMn ₂ Ni ₉
AB ₅	Ca, La, pamânturi rare	Ni, Cu, Co, Pt, Fe	CaNi ₅ , LaCu ₅ , LaNi ₅ , LaPt ₅ , LaFe ₅

V.11.2.4. Stocarea H₂ în nanotuburi și alte materiale pe bază de carbon

Utilizarea unor materiale pe bază de carbon pentru stocarea hidrogenului se bazează pe proprietățile favorabile ale acestora: greutate redusă, suprafață mare, stabilitate chimică.

Nanotuburile din carbon sunt formate din macromolecule de formă cilindrică (fig. 11.5, 11.6), având diametre cuprinse între 1...2 nm și până la 100 nm.

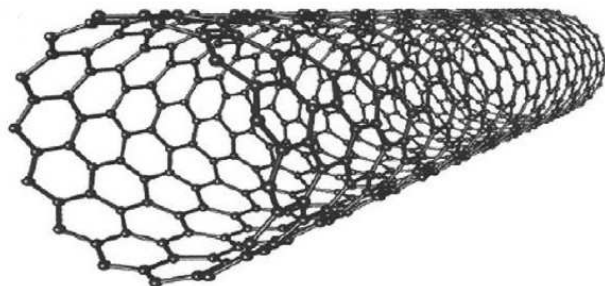


Fig. 11.5. **Nanotub din carbon** (Aqel, Abou El-Nour, Ammar, & Al-Warthan, 2012)

La începutul anilor '90 cercetările referitoare la utilizarea nanotuburilor din carbon pentru stocarea hidrogenului prin absorbția acestuia furnizau rezultate promițătoare, lucrările publicate menționând o capacitate de stocare la nivelul a 10% din greutate.

Cercetări ulterioare au redus mult perspectivele optimiste, în prezent luaându-se în calcul o capacitate de stocare sub 1,7% la o presiune de 12 MPa și temperatura camerei. Doparea nanotuburilor din carbon cu hidroxid de potasiu poate avea ca efect creșterea capacității de stocare (Krishna, Titus, Salimian, Okhnay, & et al., 2012).

Stocarea hidrogenului în nanotuburi are loc ca urmare a creșterii presiunii

acestui; scăderea presiunii conduce la eliberarea hidrogenului din structură.

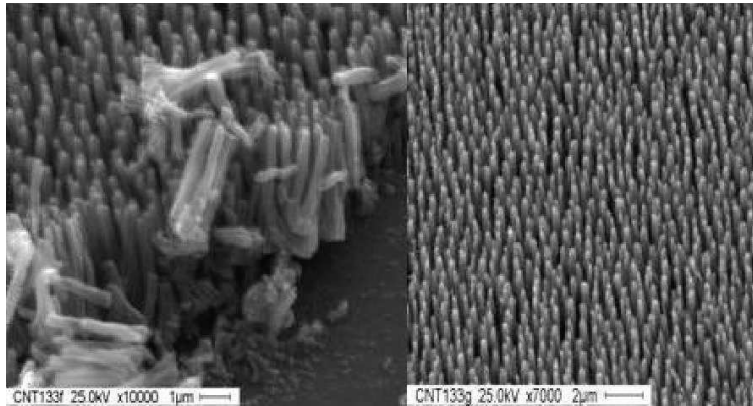


Fig. 11.6. **Structură din nanotuburi din carbon** (Niemann, și alții, 2008)

Alte materiale pe bază de carbon cum ar fi carbonul activ, fibrele din carbon activ și pulberea de grafit sunt de asemenea avute în vedere pentru stocarea hidrogenului (Mu, 2012).

În cazul carbonului activ, spre exemplu, capacitatea de stocare a hidrogenului poate atinge 1,5% la o presiune de 125 bar și o temperatură de 238°C, putând ajunge spre 23% la o presiune de 800 bar (Mukherjee, 2021).

Doparea nanotuburilor/nanofibrelor cu metale nobile (Pt) sau cu metale cum ar fi Cu sau Ni poate mări până la 2-3% capacitatea de stocare a hidrogenului la temperaturi obișnuite și presiuni de 50-100 bar (Yadav & Verma, 2017).

V. 11.3. ALIMENTAREA MOTORULUI DIESEL CU HIDROGEN

V.11.3.1. Proprietățile H₂ care influențează funcționarea motorului

Hidrogenul este inflamabil atunci când proporția de H₂ din aer (*limita de inflamabilitate*) este cuprinsă între 4 și 75% (în volum), față de 0,6-5.5% pentru combustibilul Diesel (Yip, Sma, Chun, Kook, & et al., 2019), ceea ce permite motorului să funcționeze cu amestecuri foarte sărace și cu un consum redus de combustibil. În același timp *energia minimă* necesară pentru aprinderea hidrogenului este de doar 0,02 mJ, față de 0,24 mJ pentru combustibilul Diesel. Cele două caracteristici impun anumite măsuri de siguranță, pentru a se evita aprinderea accidentală a hidrogenului. În același timp, o energie minimă de aprindere redusă poate avea ca efect aprindere necontrolată a hidrogenului în cilindru (ardere cu aprinderi secundare) de la diverse surse: supape de evacuare cu temperatură ridicată, gazele arse reziduale sau particule de ulei fierbinți (Fayaz, Saidur, Razali, & et al., 2012). Este astfel afectată funcționarea motorului: de exemplu, la motorul cu aprindere prin scânteie, acesta va continua să funcționeze

(neregulat) în lipsa scânteii electrice. Indiferent de tipul motorului, propagarea flăcării (cauzată de aprinderea secundară) în galeria de admisie, atunci când supapa de admisie este deschisă, poate provoca aprinderea hidrogenului atunci când acesta este introdus prin carburaj sau injecție în galerie. Acest fenomen este favorizat și de valoarea ridicată a vitezei de propagare a flăcării (*viteza laminară de ardere*): 1,85 m/s față de 0,37-0,43 m/s pentru benzină sau motorină. Viteza ridicată de propagare a flăcării are ca efect și o viteză mare de creștere a presiunii în cilindru în timpul arderii, însoțită de funcționarea dură a motorului.

Temperatura de autoaprindere a hidrogenului este de 858K, față de aproximativ 523K pentru motorină. Ca urmare, în cazul alimentării cu hidrogen a motorului cu aprindere prin scânteie, această proprietate permite creșterea raportului de comprimare și deci creșterea randamentului motorului; la motorul cu aprindere prin comprimare, temperatura mare de autoaprindere face dificilă și greu controlabilă aprinderea, afectând negativ performanțele motorului Diesel.

În cazul hidrogenului, *distanța minimă de stingere a flăcării* este de 0,64 mm față de peretele cilindrului, față de 2 mm pentru benzină. Ca urmare, flacăra de hidrogen ajunge mai aproape de peretele cilindrului și conduce la creșterea temperaturii acestuia, cu atât mai mult cu cât puterea calorică inferioară a hidrogenului este de aproximativ trei ori mai mare decât cea a motorinei.

Coefficientul de difuzivitate a hidrogenului este ridicat ($8,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) asigură formarea unui amestec omogen aer-combustibil, ceea ce conduce la micșorarea duratei de formare a amestecului atunci hidrogenul este introdus în cilindru prin injecție directă și la îmbunătățirea procesului de ardere.

V.11.3.2. Metode de alimentare a m.a.c. cu hidrogen

Rezistența ridicată la autoaprindere a hidrogenului este principala problemă care limitează utilizarea acestui combustibil pentru alimentarea motorului cu aprindere prin comprimare; ca urmare întârzierea la autoaprindere are valori mari, variabile în limite largi de la ciclu la ciclu.

Ca urmare, alimentarea motorului Diesel doar cu hidrogen impune utilizarea unor metode speciale de asistare a aprinderii. Una dintre aceste metode presupune utilizarea bujiei cu incandescență, ceea ce permite reducerea semnificativă a întârzierii la autoaprindere și obținerea unei presiuni medii indicate mai mari decât în cazul combustibilului Diesel clasic. Producerea de scânteie electrice multiple cu ajutorul unei bujii clasice este o altă metodă avută în vedere pentru asigurarea aprinderii hidrogenului în cilindru, dar încercările experimentale au evidențiat variații importante ale întârzierii la autoaprindere de la ciclu la ciclu, precum și creșteri semnificative ale presiunii maxime din cilindru (Dimitriou & Tsujimura, 2017). Crearea unei mișcări de vârtej în camera de ardere, corelată cu optimizarea formei camerei de ardere și a pozițiilor relative ale injectorului și bujiei (astfel încât în zona electrozilor bujiei să existe un amestec bogat în combustibil, care să se aprindă de la scânteia electrică) permit îmbunătățirea procesului de funcționare al motorului (Yip, Sma, Chun, Kook, & et al., 2019).

O altă metodă pentru controlul aprinderii și arderii o constituie alimentarea

motorului prin introducerea hidrogenului în cilindru în două faze: injecția unei doze-pilot de hidrogen cu un avans de 35°RAC față de P.M.I., urmată de introducerea dozei principale cu avans mic față de P.M.I. Mărimea dozei-pilot de hidrogen trebuie corelată cu avansul la injecția sa, în sensul micșorării cantității de hidrogen introduse odată cu creșterea avansului.

Alimentarea motorului cu aprindere prin comprimare cu hidrogen și motorină pare a fi o soluție mai promițătoare din punct de vedere al aplicabilității în practică. În mod evident, utilizarea hidrogenului drept combustibil asigură reducerea cantității de combustibil Diesel, dar metoda poate fi folosită și pentru reducerea emisiilor de particule ale motorului (care este însoțită, însă, de creșterea emisiilor de oxizi de azot, în special NO_2) (Dimitriou & Tsujimura, 2017).

În general, literatura de specialitate menționează că hidrogenul reprezintă între 10 și 40% din energia introdusă pe ciclu, dar există și lucrări care menționează valori de 5% sau 95% (Dimitriou & Tsujimura, 2017).

În această variantă de utilizare a hidrogenului, combustibilul Diesel este introdus în cilindru prin injecție, în timp ce hidrogenul este introdus:

- în galeria de admisie, prin intermediul unui carburator sau prin injecție (fig. 11.7);
- în poarta fiecărei supape de admisie, prin injecție;
- prin injecție directă în cilindru.

Primele două variante presupun introducerea hidrogenului în cilindru odată cu aerul aspirat, după începerea cursei de admisie, ceea ce are ca efect reducerea cantității de aer ce intră în cilindru (aerul fiind înlocuit de către hidrogen).

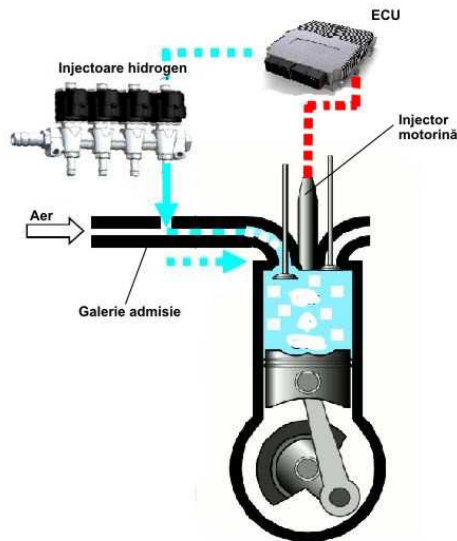


Fig. 11.7. Introducerea hidrogenului în galeria de admisie, prin injecție

În variantele în care hidrogenul este introdus în galeria de admisie sau în poarta supapei de admisie, proporția hidrogenului în energia totală introdusă pe ciclu prin combustibil reprezintă maximum 30-40% la sarcini mici și medii și

maximum 6-25% la sarcină plină (Yip, Sma, Chun, Kook, & et al., 2019) din motive legate de limitarea vitezei maxime de creștere a presiunii din cilindru și de apariția arderii detonante a amestecului din cilindru către sfârșitul arderii (din cauza creșterii presiunii și temperaturii).

Introducerea hidrogenului prin injecție directă în cilindru rezolvă problema reducerii randamentului umplerii care apare la introducerea acestuia odată cu aerul aspirat, dar impune presiuni de injecție suficient de mari (peste 100 bar) pentru a învinge contrapresiunea din cilindru. În acest caz hidrogenul se introduce în timpul comprimării. Combustibilul Diesel se introduce prin injecție, sub formă de doză-pilot, care să asigure aprinderea hidrogenului; ca urmare, proporția reprezentată de către hidrogen în energia totală introdusă prin combustibil poate depăși semnificativ limitele menționate mai sus în cazul introducerii hidrogenului odată cu aerul aspirat în cilindru. Atât hidrogenul cât și combustibilul Diesel se introduc în cilindru când pistonul se află aproape de punctul mort interior (Rorimpandey, Yip, Srna, Zhai, & et al., 2023).

Una din principalele probleme care apar în această variantă de alimentare este cea legată de echipamentul de injecție a hidrogenului și în special a injectorului, care trebuie să asigure o dozare precisă a cantității introduse într-un interval de timp foarte scurt, de ordinul milisecundelor. Fig. 11.8 prezintă, ca exemplu, un injector pentru hidrogen comandat de către combustibilul sub presiune din rampa comună a sistemului de alimentare cu combustibil Diesel.

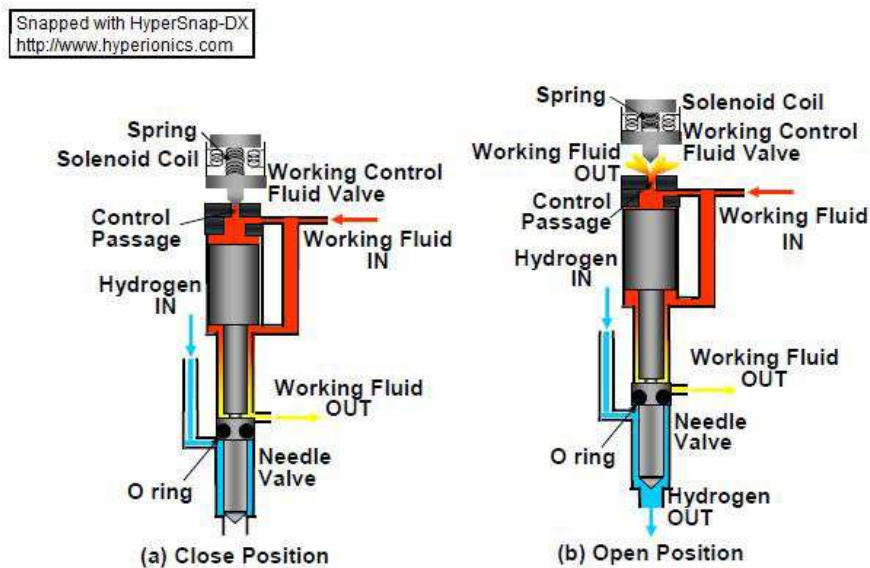


Fig. 11.8. Injector pentru hidrogen comandat de către combustibilul din rampa comună (Nogami, Yamane, Umemura, & Kawamura, 2010)

Cerințele referitoare la pozițiile relative ale celor două injectoare (pentru motorină și hidrogen) sunt de asemenea foarte importante și adeseori contradictorii; de exemplu, dacă cele două jeturi sunt convergente, sunt create condiții favorabile

pentru aprinderea hidrogenului, dar există și posibilitatea ca jetul de hidrogen să producă stingerea flăcării de combustibil Diesel (Rorimpandey, Yip, Srna, Zhai, & et al., 2023).

Bibliografie

- Ahluwalia, R., Hua, T., Peng, J.-K., Lasher, S., McKenney, K., & Sinha, J. (2009). *Technical assessment of cryo-compressed hydrogen storage tank systems for automotive applications*. Oak Ridge: Argonne National Laboratory, U.S. Department of Energy. Retrieved from <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/technical-assessment-cryo-compressed-hydrogen-storage-tank-systems>
- Andersson, J., & Gronkvist, S. (2019). Large-scale storage of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, *44*, 11901-11919.
- Aqel, A., Abou El-Nour, K. M., Ammar, R. A., & Al-Warthan, A. (2012). Carbon nanotubes, science and technology; part I: structure, synthesis and characterisation. *Arabian Journal of Chemistry*, *5*, 1-23.
- Arnold, G., & Volf, J. (2005). Liquid hydrogen for automotive application, next generation fuel for FC and ICE vehicles. *Journal of Cryogenics and Superconductivity Society of Japan*, *40* (6), 221-230.
- Dematteis, E., Barale, J., Corno, M., Sciuillo, A., & Baricco, M. (2021). Solid-state hydrogen storage systems and the relevance of a gender perspective. *Energies*, *14*, 6158.
- Dimitriou, P., & Tsujimura, T. (2017). A review of hydrogen as compression ignition engine fuel. *International Journal of Hydrogen Energy*, *42*, 24470-24486.
- Farias, C., Barreiros, R., da Silva, M., Casazza, A., Converti, A., & Sarrubo, A. (2022). Use of hydrogen as fuel: a trend of the 21st century. *Energies*, *15*, 311.
- Fayaz, H., Saidur, R., Razali, N., & et al. (2012). An overview of hydrogen as vehicle fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*, 5511-5528.
- Fayaz, H., Saidur, R., Razali, N., Anuar, F., Saleman, A., & Islam, M. (2012). An overview of hydrogen as vehicle fuel. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*, 5511-5528.
- Froudakis, G. E. (2011 (7-8)). Hydrogen storage in nanotubes and nanostructures. *Materials Today*, *14*, 324-328.
- Gurz, M., Baltacioglu, E., Hames, Y., & Kaya, K. (2017). The meeting of hydrogen and automotive: a review. *International Journal of hydrogen energy*, *42* (36), 23334-23346.
- Krishna, R., Titus, E., Salimian, m., Okhnay, O., & et al. (2012). Hydrogen storage for energy application. In J. L. (ed.), *Hydrogen storage* (pp. 243-266). London, UK; Rijeka, HR: IntechOpen.
- Lototskyy, M., Tolj, I., Klocho, Y., & et al. (2020). Metal hydride hydrogen storage tank for fuel cell utility vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, *45*, 7958-7967.

- Mu, S. (2012). Electrospun nanofibrous materials and their hydrogen storage. In J. L. (ed.), *Hydrogen Storage*. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.5772/50521>
- Mukherjee, B. (2021). Carbon nanofiber for hydrogen storage. In M. S. M. Sharon, *Carbon nanofibers: fundamentals and applications* (pp. 175-209). Beverly, MA: Scrivener Publishing LLC .
- Niemann, M. U., Srinivisan, S. S., Phani, A. R., Kumar, A., Goswami, Y. D., & Stefanakos, E. K. (2008). Nanomaterials for hydrogen storage applications: a review. *Journal of Nanomaterials*, 2008, 950967.
- Nogami, M., Yamane, K., Umemura, Y., & Kawamura, A. (2010). Development of a common-rail type high pressure hydrogen injector with a large injection rate and an ability of multiple stage injection. *Proceedings of 18th World Hydrogen Energy Conference* (pp. 181-187). Essen: Forschungszentrum Jülich GmbH, Zentralbibliothek, Verlag.
- Nour, U., Awad, S., Yusup, S., & Sufian, S. (2010). Technical evaluation of current hydrogen storage technologies for vehicles. *Journal of Applied Sciences*, 10 (12), 1200-1203.
- Pistidda, C. (2021). Solid-state hydrogen storage for a decarbonized society. *Hydrogen*, 2, 428-443.
- Pistidda, C. (2021). Solid-state hydrogen storage for a decarbonized society. *Hydrogen*, 2, 428-443.
- Rivard, E., Trudeau, M., & Zaghbi, K. (2019). Hydrogen storage for mobility: review. *Materials*, 12, 1973.
- Rorimpandey, P., Yip, H., Srna, A., Zhai, G., & et al. (2023). Hydrogen-diesel dual fuel direct injection (H2DDI) combustion under compression-ignition engine conditions. *International Journal of Hydrogen Energy*, 766-783.
- Ross, D. (2009). Hydrogen storage: the major technological barrier to the development of hydrogen fuel cell cars. *Vacuum*, 80 (10), 1084-1089.
- Wrobel, K., Wrobel, J., Tokarz, W., Lach, J., & Podsadni, K. (2022). Hydrogen internal combustion engine vehicles: a review. *Energies*, 15, 8937.
- Yadav, A., & Verma, N. (2017). Enhanced hydrogen storage in graphitic carbon micro-nanofibers at moderate temperature and pressure: Synergistic interaction of asymmetrically-dispersed nickel-ceria nanoparticles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42, 27139-27153.
- Yang, J., Sudik, A., Wolverton, C., & Siegel, D. J. (2010). High capacity hydrogen storage materials: attributes for automotive applications and techniques for material discovery. *Chemical Society Reviews*, 36, 656-675.
- Yip, H., Sma, A., Chun, A., Kook, S., & et al. (2019). A review of hydrogen direct injection for internal combustion engines: towards carbon-free combustion. *Applied Sciences*, 9, 4842.