

Ա.Ա. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ, Ռ.Հ. ԱՎՈՅԱՆ, Գ.Պ. ՎԱՐԴԱՆՅԱՆ

ԴՅՈՒՐԱԿԻՐ ՋՐԱԾՆԱՅԻՆ ԳԵՆԵՐԱՏՈՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ ԵՎ ՓՈՐՁԱՐԿՈՒՄԸ

Ջրածնային գեներատորների կիրառումը պայմանավորված է ածխաջրածնային վառելիքի պաշարների շեշտակի նվազմամբ, էներգիայի աճող պահանջարկով, ջերմոցային գազերի արտանետումների նվազեցման և էներգետիկ անվտանգության ապահովման խնդիրներով: Մյուս կողմից՝ դժվարագույն տեխնիկական խնդիր է այդ սարքերով գեներացված ջրածնի կուտակումը և տեղափոխումը՝ բարձր ճնշման տակ պահելու անհրաժեշտության և անվտանգության տեսակետից: Դա հաշվի առնելով՝ հեռանկարային են համարվում դյուրակիր ջրածնային գեներատորները՝ ցանկացած վայրում և անհրաժեշտ պահին օգտագործելու համար: Աշխատանքում մշակվել և փորձարկվել է հիմնային լուծույթում այլումինե խթանիչով աշխատող դյուրակիր ջրածնային գեներատորի լաբորատոր նախանմուշ: Կատարվել են գործնական առաջարկներ գեներատորի արդյունավետ շահագործման համար:

Առանցքային բառեր. ջրածին, ջուր, այլումին, գեներատոր, հիմնային լուծույթ:

Ներածություն: Ներկայումս ածխաջրածնային վառելիքի պաշարները (նավթ, գազ, քարածուխ, այրվող թերթաքարեր, տորֆ), ինտենսիվորեն կիրառվելու պատճառով, տարեցտարի նվազում են և մինչև 2050 թվականը կարող են գրեթե սպառվել: Արդյունահանվող ածխաջրածնի հիմնական մասը (ջուրջ 85%-ը) օգտագործվում է որպես վառելիք, այդ թվում՝ էլեկտրաէներգիայի արտադրման համար: Ընդ որում, ածխաջրածնի այրման ժամանակ մթնոլորտ է արտանետվում վնասաբեր գազերի հսկայական զանգված, այդ թվում՝ տարեկան ավելի քան 45 մլրդ *տոննա* CO₂ և մոտավորապես 68 մլն *տոննա* NO_x (2023թ.-ի տվյալներով): Ուստի ջրածնային էներգետիկայի զարգացումը դառնում է խիստ արդիական՝ հաշվի առնելով, որ ջրածնի պաշարները գործնականում անսահմանափակ են (1 չ ջրում առկա է 1.2 *մ³* ջրածին): Այն հրատապ է հատկապես սահմանափակ բնական պաշարներ և աղքատ հանածո վառելիք ունեցող այնպիսի երկրների համար, ինչպիսին Հայաստանի Հանրապետությունն է:

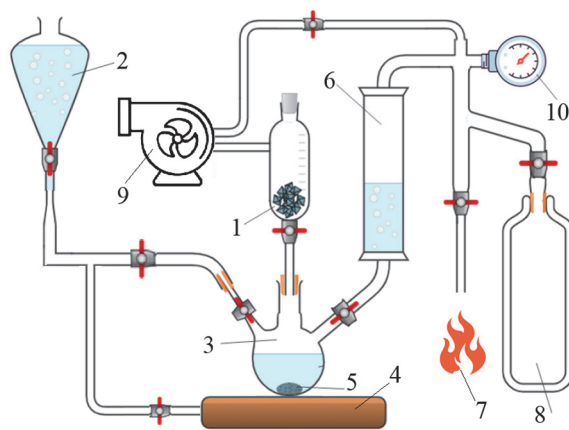
Ջրից ջրածնի կորզման դասական տեխնոլոգիան էլեկտրոլիզի եղանակն է, որը բավականին ծախսատար է և այսօրվա դրությամբ տնտեսապես արդարացված չէ (1 *մ³* ջրածնի ստացումը պահանջում է մոտավորապես 5 *կՎտ.ժ* էլեկտրաէներգիայի ծախս) [1]: Առավել հեռանկարային է ջրի մոլեկուլների էկզոթերմային

տրոհումը ջրածնի և թթվածնի՝ տարբեր մետաղական խթանիչների (կատալիզատորների) կիրառմամբ [2, 3]: Լայնորեն կիրառվող և մատչելի մետաղական խթանիչներից են արծաթը, մագնեզիումը, ալյումինը և լիթիումը, որոնցից առավել գործնական և տնտեսապես շահավետ է ալյումինը [4–6]: Այն հեշտությամբ մշակվում է, ունի էներգիայի բարձր խտություն և համալիր հետազոտված է: Ալյումինի և ջրի փոխազդեցությունից առաջանում է 3 մոլ ջրածին յուրաքանչյուր 2 մոլ ալյումինի դիմաց, ընդ որում, սենյակային ջերմաստիճանի և մթնոլորտային ճնշման պայմաններում:

Սակայն ջրածնի կիրառումը որպես էներգակիր ուղեկցվում է մի շարք թերություններով՝ պայմանավորված դրա պահպանման, տեղափոխման և բաշխման տեխնիկական ու տնտեսական դժվարություններով, ջրածին-օդ խառնուրդի պայթյունավտանգավորությամբ, ջրածնային վառելիքային տարրերի բարձր արժեքով: Այդ իսկ պատճառով կարևորվում է դյուրակիր ջրածնային գեներատորի մշակումը՝ դրանով իրականացնելով ջրածնի գեներացումը սենյակային պայմաններում, ցանկացած վայրում և անհրաժեշտ պահին:

Աշխատանքում մշակվել և փորձարկվել է ալյումինե խթանիչով աշխատող դյուրակիր ջրածնային գեներատորի լաբորատոր նախամուշ:

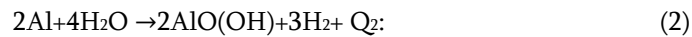
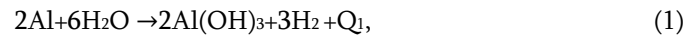
Գեներատորի կառուցվածքը և աշխատանքի սկզբունքը: Մշակված գեներատորի կառուցվածքի սխեմատիկական պատկերը և ընդհանուր տեսքը բերված են նկ. 1-ում:



Նկ. 1. Դյուրակիր ջրածնային գեներատորի կառուցվածքի սխեմատիկական պատկերը (ձախ նկար) և ընդհանուր տեսքը (աջ նկար)

Բերված սխեմայում 1 ալյումինե ջարդոնը՝ մանր տաշեղների և կտորների տեսքով, և 2 ջուրը՝ որոշակի ծավալով և արագությամբ, ներբեռնվում են 3 ռեակցի-

ոն խցիկ, որտեղ տեղի են ունենում ջրածնի գեներացմամբ հետևյալ քիմիական ռեակցիաները.



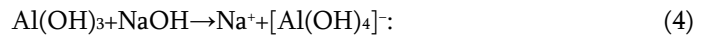
Այս ռեակցիաներն էկզոթերմային են և ուղեկցվում են $Q = 840...880$ կՋ ջերմության անջատմամբ: Ուստի շրջանառվող ռեժիմում 4 ջրի հոսքով իրականացվում է ռեակցիոն խցիկի հովացում: Ռեակցիաների 5 արգասիք $\text{AlO}(\text{OH})$ -ը կուտակվում է խցիկի ստորին հատվածում՝ հետագայում այնտեղից հեռացման և վերամշակման տեխնիկական հնարավորությամբ: Անջատված ջրածինը մաքրվում է՝ անցնելով 6 ջրային ֆիլտրով, իսկ այնուհետև կամ տրվում է անմիջականորեն 7 սպառիչ սարքին, օրինակ, գազավառարանին, կամ էլ կուտակվում է 8 գլանանոթում: Ջրածնի հոսքը փչահարվում է 9 պոմպով և հսկվում է 10 մանոմետրով:

Գեներատորի արդյունավետ աշխատանքի հիմնական խոչընդոտն այլումինե խթանիչի մակերևույթին կայուն բնական օքսիդի թաղանթի (Al_2O_3) առկայությունն է: Այն արգելակում է այլումին-ջուր ռեակցիայի ընթացքը՝ սահմանափակելով ջրի տրոհման արագությունը: Այդ թաղանթի հեռացման համար կիրառվում են, այսպես կոչված, ակտիվացման մեթոդներ, մասնավորապես՝ այլումինե ջարդոնի մեխանիկական փոշիացմամբ և ցածր հալման ջերմաստիճանով ակտիվացնող տարրերի ներմուծմամբ [7-9]: Մանրացման տեխնոլոգիան ծախսատար և էներգատար գործընթաց է, իսկ այլումինի փոշին՝ նաև պայթյունավտանգ: Որպես ակտիվացնող տարրեր կիրառվում են հեղուկ մետաղներ (օրինակ՝ գալիում, ինդիում, անագ և ցինկ), որոնց ներմուծումը մետաղական խթանիչներում իրականացվում է ներհալման կամ մեխանաքիմիական խառնման եղանակներով: Հաճախ ակտիվացնող տարրերը լեգիրացվում են մագնեզիումի կամ սիլիցիումի նանոմասնիկներով [10, 11]: Հետազոտությունները ցույց են տվել, որ թանկարժեք ակտիվացնող տարրերի պարունակությունը պետք է կազմի այլումինե խթանիչի ծավալի ոչ պակաս, քան 20%-ը [9]: Դա հանգեցնում է գեներացված ջրածնի ինքնարժեքի կտրուկ մեծացմանը:

Այլումինի օքսիդի թաղանթի քայքայման համար առավել գերադասելի է քիմիական այնպիսի հավելումների օգտագործումը, ինչպիսիք են նատրիումի հիդրօքսիդը (NaOH) կամ կալիումի հիդրօքսիդը (KOH) [12, 13]: Մեր կողմից որպես այդպիսին կիրառվել է NaOH -ը, որի առկայությամբ օքսիդը խաճատվում է հետևյալ ռեակցիայի միջոցով.



Այս ռեակցիայի արդյունքում, առանց օքսիդի պաշտպանիչ թաղանթի, ալյումինը փոխազդում է ջրի հետ՝ համաձայն (1) և (2) քիմիական ռեակցիաների՝ վերականգնելով ջրածինը: Անհրաժեշտ է նշել, որ այս փուլում առաջացած ալյումինի հիդրօքսիդը նույնպես փոխազդում է NaOH-ի հիդրօքսիդի հետ.

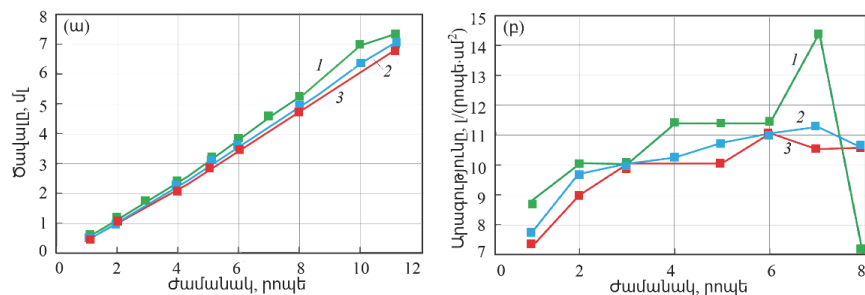


Գեներատորի փորձարկումը: Այն փորձարկվել է Բարվա ինովացիոն կենտրոնի արտադրական տեղամասում՝ հետազոտելով ժամանակի ընթացքում (t) ջրածնի գեներացման արագությունը (r) և ծավալը (V)՝ կախված ալյումինե թիթեղիկի մակերևույթի մակերեսից (S) և NaOH-ի հիմնային լուծույթի խտությունից (C): Վերականգնված ջրածնի ծավալը գնահատվել է թիթեղիկի $S = 1 \text{ սմ}^2$ մակերեսի դեպքում, իսկ գեներացման արագությունը հաշվարկվել է հետևյալ բանաձևով.

$$r = \Delta V / (\Delta t S),$$

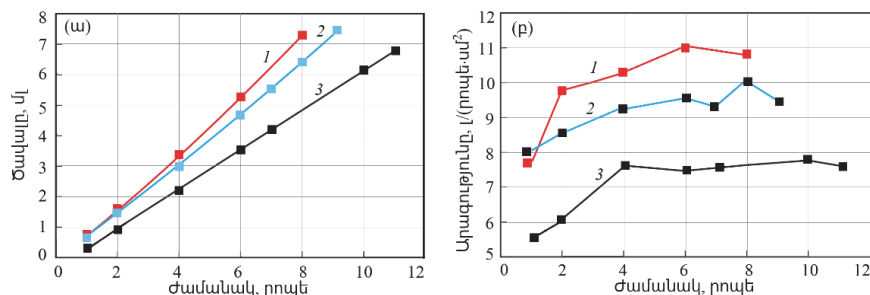
որտեղ ΔV -ն չափումների միջև գեներացված ջրածնի ծավալների տարբերությունն է, Δt -ն՝ չափումների միջև եղած տևողությունը:

Հետազոտության արդյունքները բերված են նկ. 2 և 3-ում:



Նկ. 2. Գեներացված ջրածնի ծավալի (ΔV) և գեներացման արագության (r) ժամանակային կախվածությունները թիթեղիկի մակերևույթի տարբեր մակերեսների դեպքում.

$1-S = 15 \text{ սմ}^2$, $2-S = 10 \text{ սմ}^2$, $3-S = 5 \text{ սմ}^2$



Նկ. 3. Գեներացված ջրածնի ծավալի (ΔV) և գեներացման արագության (r) ժամանակային կախվածությունները հիմնային լուծույթի տարբեր խտությունների դեպքում.

$1-C = 5 \text{ Մ}$, $2-C = 10 \text{ Մ}$, $3-C = 3 \text{ Մ}$

Հետազոտության արդյունքների վերլուծության հիման վրա կարելի է անել հետևյալ գործնական նշանակությամբ եզրահանգումները.

- Գեներացվող ջրածնի ծավալը կախված չէ ալյումինե թիթեղիկի մակերևույթի մակերեսից (նկ. 2,ա): Դա նշանակում է, որ մետաղական խթանիչը նույն խտությամբ հիմնային լուծույթում ամբողջովին կքայքայվի մոտավորապես նույն ժամանակահատվածում:

- Ալյումինե թիթեղիկի մակերևույթի մակերեսի մեծացումը հանգեցնում է ջրածնի գեներացման արագություն մեծացմանը (նկ. 2,բ):

- Ջրածնի գեներացման առավելագույն ծավալ (նկ. 3,ա) և/կամ արագություն (նկ. 3,բ) ապահովվում է NaOH-ի հիմնային լուծույթի 5 Մ խտության դեպքում:

- Ջրածնի գեներացման որոշակի արագություն ապահովելու համար անհրաժեշտ է փոփոխել ալյումինե թիթեղիկի մակերևույթի մակերեսը (նկ. 2) և/կամ NaOH-ի հիմնային լուծույթի խտությունը (նկ. 3):

Մշակված դյուրակիր ջրածնային գեներատորը կունենա կայուն պահանջարկ ջերմոցային փոքր տնտեսությունների, հյուրանոցների, զորամասերի, առանձնատների և դպրոցների անհատական ջեռուցման համար: Նպատակահարմար է նաև ջրածնային վառելիքային տարրերի հետ համատեղ կիրառումը: Դրանք կարող են փոխարինել կամ լրացնել թե՛ շարժիչների և թե՛ փոքր էլեկտրակայանների աշխատանքը՝ հանդես գալով որպես էլեկտրաէներգիայի աղբյուր՝ դյուրակիր սարքավորումների (օրինակ՝ բջջային հեռախոսներ, տեսախցիկներ), էլեկտրամոբիլների, բնակելի ու արտադրական շենքերի համար: Հեռանկարային է նաև ջրածնային գեներատոր-ջրածնային վառելիքային տարր համակարգի հիբրիդային կիրառումը ֆոտովոլտային (արևային) մոդուլների հետ՝ բացառելով թանկարժեք էներգիայի կուտակիչների (մարտկոցների) օգտագործումը: Այս դեպքում համակարգը կգործարկվի և կգեներացնի ջրածին և էլեկտրաէներգիա արևի ցածր ակտիվության ժամանակ (գիշերը և ամպամած եղանակին), երբ ֆոտովոլտային մոդուլները չեն շահագործվում: Hybrid Optimization Modeling Software (HOMER, ԱՄՆ) ծրագրով [14] նախնական գնահատումները ցույց են տալիս, որ կախված համակարգի և ֆոտովոլտային մոդուլների դրվածքային հզորություններից՝ էլեկտրաէներգիայի «գուտ բերված արժեքը» (NPV, Net Present Value) և ինքնարժեքը նվազում են 13...21 %-ով:

Եզրակացություն: Մշակվել է ջրածնային գեներատոր, որն ալյումինե խթանիչի կիրառմամբ և հիմնային նոսր լուծույթում օքսիդացման-վերականգնման ռեակցիաների արդյունքում գեներացնում է պահանջվող ծավալով ջրածին՝ որպես զազ կամ հեղուկ բարձր ճնշման տակ առանց ծախսերի և անվտանգության հետ կապված խնդիրների այն պահելու համար: Իրականացվել են ժամանակի ընթացքում ջրածնի գեներացման արագության և ծավալի հետազոտություններ՝ հաշվի առնելով ալյումինե թիթեղիկի մակերևույթի մակերեսը և հիմնային լուծույթի խտությունը:

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ՑԱՆԿ

1. **El-Emam R.S., Ozcan H.** Comprehensive Review on the Technoeconomics of Sustainable Large-scale Clean Hydrogen Production // *J. Clean. Prod.* - 2019. - V. 220. - P. 593-609.
2. **Zhu B., Zou R., Xu Q.** Metal–Organic Framework Based Catalysts for Hydrogen Evolution // *Adv. Energy Mater.* - 2018. - V. 8(24). - P. 1801193-1801199.
3. **Huang M., Ouyang L., Zhu M.** Hydrogen Production via Hydrolysis of Mg-Oxide Composites // *Int. J. Hydrogen Energy.* - 2017. - V. 42(35). - P. 22305–22311.
4. **Buryakovskaya O.A., Maslakov K.I., Borshchev N.O., Ambaryan G.N.** Silver-Assisted Hydrogen Evolution from Aluminum Oxidation in Saline Media // *Molecules.* - 2024. - V. 29(2). - P. 530-541.
5. **Wang W., Chen W., Zhao X.M.** Effect of Composition on the Reactivity of Al-Rich Alloys with Water // *Int. J. Hydrogen Energy.* - 2012. - V. 37(24). - P. 18672–18678.
6. **Ilyukhina A.V., Kravchenko O.V.** Studies on Microstructure of Activated Aluminum and Its Hydrogen Generation Properties in Aluminum/Water Reaction // *J. Alloys Compd.* - 2017. - V. 690. - P. 321–329.
7. **Parmuzina A.V., Kravchenko O.V.** Activation of Aluminium Metal to Evolve Hydrogen from Water // *Int. J. Hydrogen Energy.* - 2008. - V. 33(12). - P. 3073–3076.
8. **Nizovskii A.I., Kulikov A.V., Trenikhin M.V.** Material for Compact Hydrogen Cartridges Based on Commercial Aluminium Alloys Activated by Ga-In Eutectics // *Catal. Sustain. Energy.* - 2017. - V. 4. - P. 62–69.
9. **Xu S., Zhao X., Liu J.** Liquid Metal Activated Aluminum-Water Reaction for Direct Hydrogen Generation at Room Temperature // *Renew. Sustain. Energy Rev.* - 2018. - V. 92. - P. 17-37.
10. **Meroueh L., Eagar T.W., Hart D.P.** Effects of Mg and Si Doping on Hydrogen Generation via Reduction of Aluminum Alloys in Water // *ACS Appl. Energy Mater.* - 2020. - V. 3. - P. 1860–1868.
11. **Ayvazyan G., Vaseashta A., Gasparyan F., Khudaverdyan S.** Effect of Thermal Annealing on the Structural and Optical Properties of Black Silicon // *J. Mater. Sci: Mater. Electron.* - 2022. - V. 33. - P. 17001–17010.
12. **Mezulis A., Richter C., Lesnichenoks P., Knoks A.** Studies on Water–Aluminum Scrap Reaction Kinetics in Two Steps and the Efficiency of Green Hydrogen Production // *Energies.* - 2023. - V. 16(14). - P. 5554–5566.
13. **Porciúncula C.B., Marcilio N.R., Tessaro I.C., Gerchmann M.** Production of Hydrogen in the Reaction Between Aluminum and Water in the Presence of NaOH and KOH // *Braz. J. Chem. Eng.* - 2012. - V. 29. - P. 337–348.
14. **Костик Н.Р., Тарасов С.А., Айвазян Г.Е.** Исследование возобновляемого потенциала Республики Армения при реализации гибридной автономной системы энерго-снабжения с использованием фотоэлектрических преобразователей солнечного света // *Изв. высших учеб. зав. России. Радиоэл.* - 2023. - V. 26(4). - С. 106-122.

Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարան: Նյութը ներկայացվել է խմբագրություն 06.02.2025:

А.А. ВАРДАНЯН, Р.О. АВОЯН, Г.П. ВАРДАНЯН

**РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ ПОРТАТИВНОГО ВОДОРОДНОГО
ГЕНЕРАТОРА**

Использование водородных генераторов обусловлено значительным сокращением запасов углеводородного топлива, растущим спросом на энергию, необходимостью сокращения выбросов парниковых газов и обеспечением энергетической безопасности. В то же время одной из наиболее сложных технических задач является накопление и транспортировка водорода, генерируемого этими устройствами, учитывая необходимость хранения под высоким давлением и вопросы безопасности. Исходя из этого, перспективным решением являются портативные водородные генераторы, которые можно использовать в любом месте и в нужный момент. В представленной работе разработан и испытан лабораторный прототип портативного водородного генератора, работающего на алюминиевом катализаторе в щелочном растворе. Даны практические рекомендации по эффективной эксплуатации генератора.

Ключевые слова: водород, вода, алюминий, генератор, щелочной раствор.

A.A. VARDANYAN, R.H. AVOYAN, G.P. VARDANYAN

DEVELOPMENT AND TESTING OF A PORTABLE HYDROGEN GENERATOR

The use of hydrogen generators is driven by the significant reduction in hydrocarbon fuel reserves, the growing demand for energy, the need to reduce the greenhouse gas emissions, and ensuring energy security. At the same time, one of the most challenging technical issues is the storage and transportation of hydrogen generated by these devices, given the requirement for high-pressure storage and safety considerations. Based on this, portable hydrogen generators, which can be used anywhere and at any time, present a promising solution. This study developed and tested a laboratory prototype of a portable hydrogen generator operating on an aluminum catalyst in an alkaline solution. Practical recommendations are provided for the efficient operation of the generator.

Keywords: hydrogen, water, aluminum, generator, alkaline solution.