

КОРИШЋЕЊЕ ХТГР НУКЛЕАРНИХ РЕАКТОРА У ОКВИРУ КОГЕНЕРАТИВНИХ СИСТЕМА ЗА ПРОИЗВОДЊУ ЕНЕРГИЈЕ**UTILIZATION OF HTGR NUCLEAR REACTORS WITHIN COGENERATION ENERGY SYSTEMS**Исидора Бурлица, *Факултет техничких наука, Нови Сад***Област – МАШИНСТВО**

Кратак садржај – Мастер рад се састоји из три велике целине: општег увода у нуклеарну енергију и нуклеарне реакторе, упознавања са ХТГР реакторима и њиховим принципом рада и примени ове технологије у когенеративним постројењима. У првој целини објашњене су нуклеарне реакције, делови реактора, а затим и његов принцип рада и подела нуклеарних електрана. Други део обухвата опис ТРИСО горива и принцип рада ХТГР реактора, са посебним нагласком на безбедност, како је то једна од његових најбитнијих карактеристика. Последња целина рада тиче се интеграције ХТГР-а у когенеративне енергетске системе, уз кратак осврт на економске аспекте ове технологије.

Кључне речи: нуклеарна енергија, ХТГР реактор, когенеративна постројења, ТРИСО гориво.

Abstract – The Master's thesis is structured into three main sections: a general introduction to nuclear energy and nuclear reactors, an overview of HTGR reactors and their operating principles, and the application of this technology in cogeneration plants. The first section explains nuclear reactions, the components of a reactor, as well as its operating principle and the classification of nuclear power plants. The second section covers the description of TRISO fuel and the operating principle of HTGR reactors, with particular emphasis on safety, as it represents one of their most important characteristics. The final section of the thesis concerns the integration of HTGRs into cogeneration energy systems, including a brief consideration of the economic aspects of this technology.

Keywords: nuclear energy, HTGR reactor, cogenerative plants, TRISO fuel

1. УВОД

Гасови стаклене баште све више угрожавају нашу планету и здравље. У циљу ограничења пораста глобалне температуре на 1,5°C до краја века, одржан је Париски споразум, међународни уговор о климатским променама. Верује се да нуклеарна енергија може

НАПОМЕНА: Овај рад проистекао је из мастер рада чији је ментор био др Ђорђије Додер, ванр. проф.

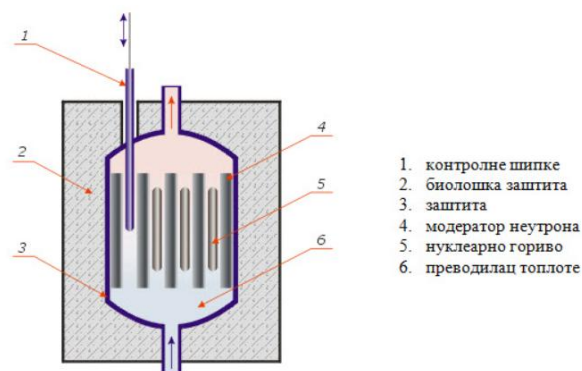
играти велику улогу у постизању овог циља, обзиром на њену поузданост и распрострањеност горива. Посебну пажњу је задобио ХТГР реактор, који захваљујући високим температурама радног медијума на крају процеса, може когенеративно да се искористи за још неки индустријски процес, поред примарне производње електричне енергије.

2. НУКЛЕАРНА ФИЗИКА

Основне нуклеарне реакције у природи су фузија и фисија. Фузијом се лакша атомска језгра спајају у једно теже при чему ослобађају енергију, док је фисија процес цепања нестабилног језгра на два, чиме се ослобађа енергија која се користи у данашњим комерцијалним реакторима.

2.1. Нуклеарни реактор

Нуклеарни реактор је посуда под притиском у којој се одвија контролисана ланчана реакција фисије [3]. Његови делови су гориво, модератор, управљачке шипке, систем за хлађење, рефлектор и заштитни систем, а приказани су на слици 1:



Слика 1. Делови нуклеарног реактора [1]

Гориво може да се нађе у облику горивих шипки и као шљунковито гориво. Контролне шипке омогућавају регулисање ланчане реакције у виду повећања или смањења стопе фисије. Модераторе користимо како би успорили брзе неутроне. Рефлектор служи да врати неутроне назад у средиште реактора и тако да искористимо што већи број неутрона. Rashladno средство, тј. радни флуид је медијум који преноси

топлоту из језгра реактора до турбине, а такође самим тим и хлади реактор. Све ове компоненте су смештене у реакторској посуди под притиском.

Принцип рада нуклеарне електране је следећи: у језгру се одвија процес фисије. Кроз реактор циркулише медијум који преноси топлоту насталу цепањем језгра атома. Расхладно средство у измењивачу топлоте индиректно загрева воду и претвара је у пару, због чега се оно хлади и наставља да циркулише кроз систем. Настала водена пара се доводи до турбине коју окреће, чиме се покреће генератор који производи електричну енергију.

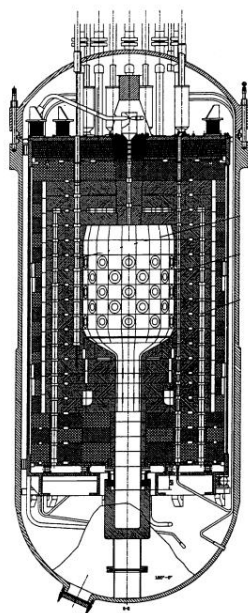
Постоје четири генерације нуклеарних реактора, од којих је свака напреднија од своје претходне, а ХТГР спада у четврту. Реактори се такође могу класификовати према енергији неутрона који изазивају фисију, rashladном средству, употреби и фази горива.

Призматични дизајн и дизајн са шљунковитим лежиштем, се виде на *слици 2*:



Слика 2. Призматични дизајн и дизајн са шљунковитим лежиштем [5]

3. ХТГР РЕАКТОРИ



Слика 3. ХТГР-10 [2]

Високо температурни гасом хлађени реактор (ХТГР) је технологија нуклеарног фисионог реактора који користи хелијум за хлађење и графит за модерацију [2]. Гориво ових реактора је смештено у ТРИСО честице које се састоје од језгра уранијума, угљеника и кисеоника, а облога од три слоја материјала на бази керамике спречава ослобађање радиоактивних производа фисије ван ових граница [2]. Опис ХТГР технологије ће се усвојити од постојећег ХТГР-10 кинеског реактора (слика 3).

Језгро се састоји од 27.000 горивих елемената и окружено је графитним

Канали за хладан хелијум су пројектовани унутар бочног рефлектора и кроз њих гас путује нагоре након што уђе у посуду под притиском, а затим му се ток обрће на врху језгра реактора како би скренуо ка лежишту од куглица (гориву). Након што се загреје и дође до доњег дела реактора, ту улази у цев за врућ гас и њом путује до измењивача топлоте [2].

2.2 Безбедност ХТГР-а

Нуклеарне несреће углавном настају због заостале/остатне топлоте распадања што доводи до топљења језгра. У конвенционалним реакторима, одвођење топлоте се одвија активним системима за хлађење као што су пумпе, док је расхладни флуид вода, који не може да врши своју улогу уколико дође до промене њеног агрегатног стања. У ХТГР реактору, остатна топлота се одводи путем гаса—најчешће хелијума, где чак и при отказу компресора, хлађење реактора ће се наставити захваљујући природној конвекцији. Хелијум не може да реагује са другим хемијским елементима, није запаљив и не може постати радиоактиван.

Топљење језгра није могуће [3].

Највиша температура која може да се постигне у језгру реактора (1600°C у екстремним условима) је испод било које температуре при којој би се гориво оштетило, захваљујући ТРИСО дизајну горива [3].

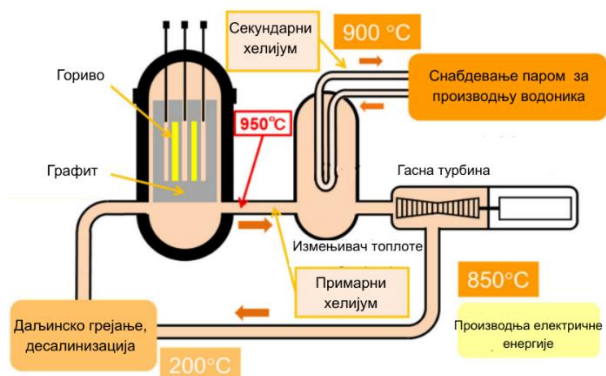
Чак и ако контролне шипке, апсорбујуће куглице или хелијум откажу, реактор ће природно зауставити фисију и охладиће се сам од себе због негативног температурног коефицијента реактивности [3].

Велики је однос површине суда у односу на запремину, што значи да је топлота која се изгуби преко површине језгра већа од оне која се ствара распадом горива у језгру [3].

Упркос свим контроверзијама у свету, доказано је да је нуклеарна енергија безбеднија од енергије из фосилних горива. Истраживања су показала да је угаљ усмртио 100 пута више људи од нуклеарне енергије, углавном као последица загађења ваздуха, а откад свет користи енергију фисије, израчунато је да је сачувано 1,84 милиона живота између година 1971. и 2009. Чак се процењује да су енергија биомасе, соларна, хидро и ветро енергија однеле више живота од нуклеарне [3].

4. ИНТЕГРАЦИЈА ХТГР-А У КОГЕНЕРАТИВНЕ СИСТЕМЕ

Нуклеарна когенерација представља истовремену производњу електричне енергије и топлоте или производа добијених из топлоте у току рада нуклеарне електране. ХТГР технологија је идеална за ову сврху, обзиром на то да су температуре хелијума на крају процеса високе и као такве углавном се само пуштају у атмосферу и губе свој потенцијал да се преусмере као извор топлоте на још неки процес. Општи процес когенерације из нуклеарне енергије је приказан на *слици 4*:



Слика 3. Шема когенеративног ХТГР постројења [5]

Секундарна топлота из ХТГР-а се може искористити у процесима за даљинско грејање, дестилацију, процесну топлоту за индустријске системе, експлоатацију нафте и катранских пескова, прераду сирове нафте, утечњавање и гасификацију угља, производњу амонијака, метанола, тешких метала и водоника.

4.1 Систем даљинског грејања

Примена система даљинског грејања зависи од климе и могућности да се у тој жељеној регији обезбеди ниво комфора у грејању. Главни извори енергије који се данас користе за производњу топлоте за домаћинства су угаљ и гас, док је проценат нуклеарне топлоте у ове сврхе занемарљив.

Општи принцип рада когенерације топлоте за даљинско грејање из ХТГР-а почиње са делом паре која излази из измењивача топлоте и која се усмерава ка посебној турбини ниског притиска. Тако експандирана пара се затим кондензује у измењивачу топлоте, предајући топлоту у цевовод за даљинско грејање. Модификације електране ради увођења овог система су прилично умерене и могу се реализовати без ометања уобичајеног рада постројења [4].

4.2 Десалинизација

Како се све већи број места суочава са несташицом воде, десалинизација ће постати кључна технологија за решавање овог проблема. Ово иде у прилог нуклеарној енергији, за коју се очекује да ће постати одржива опција за велике системе десалинизације широм света [4].

Десалинизацију воде можемо да вршимо помоћу више техника: РО (обрнуте осмозе), МСФ (вишестепена флеш дестилација) или МЕД (вишеефектна дестилација) техника. Иако се МСФ показала као најједноставнији и најпоузданији од главних процеса, њен значајан недостатак је већа потрошња енергије у односу на МЕД и РО. Међутим, решење може да лежи управо у ХТГР реакторима, који би ефикасно понудили своју отпадну топлоту за овај процес.

Примену овог случаја можемо наћи на јапанском ХТГР реактору ГХРГР3000.

4.3 Процесна топлота за индустријске системе

У зависности од температурног опсега, потребе за топлотом у оквиру одређеног индустријског процеса

могу се задовољити прилагођавањем конфигурације когенеративног система одговарајућем типу нуклеарног реактора [4].

Поред производње електричне енергије, висока излазна температура флуида може се користити за низ индустријских процеса који захтевају топлоту у распону од 650°C до 950°C. Неке од примера су:

- експлоатација нафте и катранских пескова
- прерада сирове нафте
- утечњавање и гасификација угља
- производња амонијака
- производња метанола
- производња тешких метала

4.1 Производња водоника

Неки сектори су компликованији у постизању декарбонизације, као на пример авијација и камионски транспорт. Један од начина њиховог декарбонизовања може бити употреба водоника као горива, али да би цео систем био CO₂ неутралан, тај водоник морамо да добијемо из неког чистог извора. Тада наступају ХТГР реактори, као идеално решење, чија је отпадна топлота довољна да произведе извор енергије потребан за покретање реакције електролизе.

Електролиза је процес у којем се помоћу електричне енергије вода разлаже на водоник и кисеоник, док се све то одвија у уређају званом електролизер.

Водоник се може когенерисати уз помоћ нуклеарне топлоте електролизом воде или паре, хемијским реформингом фосилних горива и биомасе и термохемијским процесима разградње паре.

Принцип рада је следећи: примарни хелијум, загрејан до високе температуре у реактору, предаје своју топлоту секундарном хелијуму у интермедијарном измењивачу топлоте унутар зграде реактора. Секундарни хелијум, који је потпуно чист и без радиоактивности, излази из заштитног система и преко посебног цевовода преноси топлоту до постројења за производњу водоника (нпр. реформера или термохемијског циклуса). У том процесу се, уз помоћ доведене топлоте, одвија конверзија сировине у водоник. Након што је предао топлоту и охладио се, секундарни хелијум се помоћу циркулационе пумпе враћа у интермедијарни измењивач топлоте, чиме се циклус затвара.

5. ЕКОНОМСКИ АСПЕКТИ

Трошкови изградње нуклеарних електрана драматично су порасли у последњих неколико година: са 2.500 €/kW двадесетих година на више од 6.000 €/kW, што је један од већих проблема за њихов развој. Нуклеарне електране су велики пројекти чија изградња захтева неколико хиљада радника и читаву деценију грађевинских радова. Ситуација је још неповољнија за ХТГР реакторе, како је њихова технологија још комплекснија и мање комерцијална.

У цену ХТГР-а убрајају се трошкови изградње, горива и трошкови рада и одржавања.

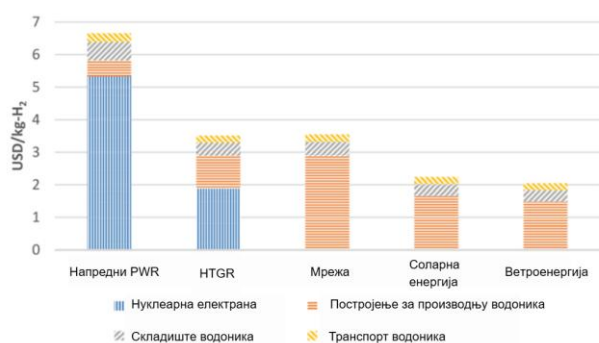
Када је у питању производња водоника, обновљиви извори нуде најнижи трошак, посебно ветроелектране, са ценом од 2,05 \$/kg водоника, што је нешто ниже у односу на соларне електране чија цена износи 2,24 \$/kg [6]. При поређењу напредних реактора са водом под притиском и ХТГР реактора, свакако да ХТГР остварује нижи трошак производње водоника [6].

Значајну улогу у смањењу трошка водоника игра повећање обима постројења (снаге и модула). Многе студије случаја показују да нуклеарно даљинско грејање може бити ценовно конкурентно чак и у односу на природни гас, што је још лакше оствариво уз примену пореза на угљеник [4].

Производња амонијака уз коришћење нуклеарне енергије има најниже оперативне трошкове, али највише капиталне.

Најнижи трошак производње водоника постигнут је коришћењем електричне енергије из ветра, а одмах затим и из соларних фотонапонских система. Ове вредности су за око 1,3 \$/kg ниже од оних из ХТГР [6].

Резултати су приказани на слици 6:



Слика 4. Поређење трошкова производње водоника из различитих извора енергије [6]

Међутим, ове анализе често не узимају у обзир недоступност обновљивих извора у зависности од доба дана и временске прогнозе, што нам не даје загарантовану производњу када нам је потребна. То би подразумевало додатни трошак у виду складишта енергије и додатне емисије при производњи исте. Такође се не узима у обзир чињеница да нуклеарна електрана заузима знатно мање простора од соларних електрана и ветропаркова, што отвара могућност ка искоришћењу тог земљишта за још нешто што би могло бити профитабилно. Другим речима, сама цена произведене сировине нема увек главну улогу у одабиру начина из којег ће водоник да се произведе.

Уколико би се ова технологија комерцијализовала и почела да се производи масовније, њена цена би свакако значајно опала. Нажалост, овде више улогу не играју само цифре, већ и људска осећања која су често негативна када је у питању нуклеарна технологија.

6. ЗАКЉУЧАК

ХТГР реактори представљају зrelu технологију која може да обезбеди стабилно снабдевање топлотом и електричном енергијом. Посебно се одликују високим

нивоом безбедности који омогућавају напредни сигурносни системи.

Топлота произведена уз помоћ ХТГР-а може да се искористи, поред производње електричне енергије, и за широк спектар додатних производа који могу да буду део даљинског грејања и хлађења, процесне топлоте, десалинизације, производње водоника и друго.

Обзиром на неповерење које су људи изградили према нуклеарној енергији, ХТГР реактори су можда последња шанса да се то поверење врати, ако би се стручна лица ангажовала да изнесу све чињенице и појашњења о високој безбедности и ефикасности ове технологије.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Nuklearni reaktori. Fisis.rs – Физика–атомског језгра. <https://fisis.rs/гимназија/iv-разред/физика-атомског-језгра/nuklearni-reaktori/> [Приступ 10.06.2025].
- [2] Advanced Nuclear Materials in HTGR. In: High Temperature Reactor Technology Workshop ICTP; 19 - 30 2008; Trieste, Italy.
- [3] PBMR's Safety Features. U.S. Nuclear Regulatory Commission. <https://www.nrc.gov/docs/ML0310/ML031000208.pdf> [Приступ 20.06.2025].
- [4] Guidance on Nuclear Energy Cogeneration. IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-1.17. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2019.
- [5] Tachibana Y. "Current Status of IAEA's Research and Development on HTGR". Presentation at Nuclear Innovation Workshop; 2022 Mar 1; Tokyo, Japan. https://nicp.ne.titech.ac.jp/jp/nice/2022/220301/JAEA_HTGR.pdf [Приступ 09.07.2025]
- [6] Alabbadi AA, Smith RL, Brown P, et al. "A comparative economic study of hydrogen production using several nuclear reactors integrated with electrolysis hydrogen production methods". International Journal of Hydrogen Energy. 2024; 49(38):12688-12704. doi:10.1016/j.ijhydene.2023.04.2787.



Исидора Бурлица је рођена у Сремској Митровици 1999. године. Мастер рад на Факултету техничких наука из области Машинства одбранила је 2025. године.
Контакт: isidoraburlica@gmail.com