ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ՊՈԼԻՏԵԽՆԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԼՍԱՐԱՆ

ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ ԱՐՄԱՆ ԴԱՎԹԻ

ՋՋԷՌ-440 ՌԵԱԿՏՈՐՈՎ ԷՆԵՐԳԱԲԼՈԿՆԵՐՈՒՄ ԾԱՆՐ ՎԹԱՐՆԵՐԻ ԴԵՊՔՈՒՄ ՋՐԱԾՆԱՅԻՆ ՎՏԱՆԳԻ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒՄԸ ԵՎ ՄԵՂՄԱՆ ՄԵԹՈԴՆԵՐԻ ՄՇԱԿՈՒՄԸ

Ե. 14.02 - «Միջուկային էներգետիկ կայանքներ» մասնագիտությամբ տեխնիկական գիտությունների թեկնածուի գիտական աստիճանի հայցման ատենախոսության

ՍԵՂՄԱԳԻՐ

ԵՐԵՎԱՆ 2019

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ АРМЕНИИ

ГРИГОРЯН АРМАН ДАВИДОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДОРОДНОЙ УГРОЗЫ ПРИ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЯХ НА ЭНЕРГОБЛОКАХ С РЕАКТОРОМ ВВЭР-440 И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СМЯГЧЕНИЯ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.02 – “Ядерные энергетические установки”

ЕРЕВАН 2019

Ատենախոսության թեման հաստատվել է Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում:

Գիտական ղեկավար՝	տ.գ.դ., պրոֆ.	Վ.Գ. Պետրոսյան
Պաշտոնական ընդդիմախոսներ՝	ֆ.-մ.գ.դ., պրոֆ.	Ա.Ժ. Խաչատրյան
	տ.գ.թ.,դոց.	Ա.Պ. Սահակյան
Առաջատար կազմակերպություն՝	«Երևանի պետական համալսարան»	

Ատենախոսության պաշտպանությունը կայանալու է 2019թ. հուլիսի 25-ին, ժամը. 10^{00}-ին Հայաստանի ազգային պոլիտեխնիկական համալսարանում գործող ԲՈԿ-ի Էներգետիկայի 043 մասնագիտական խորհրդի նիստում (հասցե՝ 0009, Երևան, Տերյան փ., 105, 2-րդ մասնաշենք, 2431):

Ատենախոսությանը կարելի է ծանոթանալ ՀԱՊՀ գրադարանում:
Սեղմագիրն առաքվել է 2019թ. հունիսի 14-ին:

Մասնագիտական խորհրդի
Գիտական քարտուղար,
տ.գ.թ.՝ Ա.Ա. Գևորգյան

Тема диссертации утверждена в Национальном политехническом университете Армении.

Научный руководитель:	д.т.н., проф.	В.Г. Петросян
Официальные оппоненты:	д.ф.-м.н., проф.	А.Ж. Хачатрян
	к.т.н.,доц.	А.П. Саакян
Ведущая организация:	“Ереванский государственный университет”	

Защита диссертации состоится 25-го июля 2019г. в 10^{00} часов на заседании специализированного совета ВАК 043 – “Энергетика”, действующего при Национальном политехническом университете Армении (НПУА) (адрес: 0009, Ереван, ул. Теряна, 105, корпус 2, 2431).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НПУА.
Автореферат разослан 14-го июня 2019г.

Ученый секретарь
Специализированного совета,
к.т.н. А.А. Геворгян

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ԸՆԴՀԱՆՈՒՐ ԲՆՈՒԹԱԳԻՐԸ

Աշխատանքի արդիականությունը: Ծանր վթարների դեպքում ջրածնային պայթյունաանվտանգության հուսալի և արդյունավետ ապահովման խնդրի արդիականությունը առաջին անգամ ակնհայտ դարձավ Թրի Մայլ Այլնդի արտանախագծային վթարից հետո և սրվեց 2011 թվականին Ֆուկուշիմա Դաիչի ԱԷԿ-ում տեղի ունեցած ծանր վթարից հետո: Վերջինը՝ ջրածնի վթարային հեռացման և դրա կոնցենտրացիայի հսկման համակարգերի բացակայության պատճառով ուղեկցվեց ջրածնի հզոր պայթյունների հետևանքով ռեակտորային շինությունների փլուզումներով և դրանց հաջորդող ռադիոակտիվ անկառավարելի արտանետումներով դեպի շրջակա միջավայր: Չնայած խնդրի սրությանը, ներկայումս աշխարհում շահագործվող շատ ԱԷԿ-ներում ջրածնային անվտանգության ապահովման հարցերը գործնականում շարունակում են մնալ մասամբ չլուծված: Մասնավորապես Հայկական ԱԷԿ-ի (ՀԱԷԿ) 2-րդ էներգաբլոկում, որի շահագործման ժամկետը նախատեսված է երկարաձգել 10 տարով, դեռևս գոյություն չունի ծանր վթարների դեպքում ջրածնային վտանգի մեղմման վերջնական հայեցակարգ, ինչպես անհրաժեշտ վթարային շահագործման փաստաթղթերի, այնպես էլ համակողմանիորեն հիմնավորված տեխնիկական միջոցների առկայության տեսանկյունից: Գոյություն չունի նաև միասնական մոտեցում ծանր վթարների դեպքում ջրածնային վտանգի մեղմման մեթոդների ընտրության հարցում, ինչը որոշ դեպքերում պայմանավորված է ԱԷԿ-ների տարբեր նախագծերի առանձնահատկություններով, ինչպես նաև անհրաժեշտ համակողմանի հետազոտությունների բացակայությամբ:

Ելնելով վերոնշյալ հանգամանքներից, ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկներում ծանր վթարների դեպքում ջրածնային վտանգի համակողմանի հետազոտումը և ջրածնային վտանգի մեղմման նոր մեթոդների մշակումը դառնում է խիստ արդիական խնդիր:

Աշխատանքի նպատակը: Ատենախոսական աշխատանքի նպատակն է ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկներում (ՀԱԷԿ-ի շահագործվող 2-րդ էներգաբլոկի օրինակով), ծանր վթարների դեպքում ջրածնային վտանգի խորը և համակողմանի ուսումնասիրումը, և ջրածնային վտանգի մեղմման այլընտրանքային մեթոդների մշակումը, որոնց ներդրումը թույլ կտա նվազեցնել հնարավոր ծանր վթարի դեպքում ջրածնի այրման հետևանքով հերմետիկ շինության ամբողջականությանը սպառնացող վտանգը:

Հետազոտության մեթոդիկան: Հետազոտությունների շրջանակներում դրված խնդիրների լուծման նպատակով մշակվել են առանձին հաշվարկային մեթոդիկաներ, իսկ նախապես ընտրված ծանր վթարային սցենարների դեպքում ջրածնի առաջացման, ինչպես նաև ջրածին-շոգեգազային խառնուրդի կազմի փոփոխության դինամիկայի հետազոտման համար կիրառվել է MELCOR 1.8.5 երկչափ հաշվարկային կոդով մշակված մոդելը, որը լայնորեն օգտագործվում է ՀԱԷԿ-ի 2-րդ էներգաբլոկի ծանր վթարային սցենարների վերլուծություններում:

Գիտական արդյունքները և նորույթը:

1. Մշակվել է հաշվարկային մեթոդիկա, որով գնահատվել է ծանր վթարի դեպքում ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկի հերմետիկ շինության ֆիզիկական ամբողջականությանը սպառնացող ջրածնի սահմանային քանակությունը:
2. Հիմնավորվել է, որ ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկների դեպքում ծանր վթարի զարգացման արտաիրանային փուլում պայթյունավտանգ գազային խառնուրդի ձևավորման վտանգի կանխման միակ ռացիոնալ եղանակը թթվածնի ցածր կոնցենտրացիայի ապահովումն է:
3. Մշակվել է հաշվարկային մեթոդիկա, որը թույլ է տալիս մանրամասն հետազոտել ծանր վթարի զարգացման պայմաններում հերմետիկ գոտու պատերին ջրային գոլորշու կոնդենսացման ազդեցությունը ջրածին-օդ-ջրային գոլորշի խառնուրդի այրվող կազմի ձևավորման վտանգի վրա:

4. Բացահայտվել են ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկներում ջրածնի պասսիվ ավտոկատալիտիկ ռեկոմբինատորների (ՋՊԱՌ) ներդրման խնդիրները:
5. Մշակվել են ծանր վթարների դեպքում ջրածնային վտանգի մեղմման մեթոդներ, որոնք կարող են ներդրվել ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկներում, որպես ՋՊԱՌ-ի համակարգերին այլընտրանք:
6. Իրականացվել է ջրածնի մոնիտորինգի համակարգի պահանջվող բնութագրերի համակողմանի ուսումնասիրություն՝ հիմնված ծանր վթարի դեպքում ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկի հերմետիկ գոտում շոգեգազային միջավայրի պարամետրերի փոփոխության առանձնահատկությունների վերլուծության վրա:

Աշխատանքի արդյունքների գործնական նշանակությունը: Ծանր վթարների դեպքում ջրածնային վտանգի համակողմանի հետազոտության արդյունքները, ջրածնի մոնիտորինգի համակարգի բնութագրերի ուսումնասիրության արդյունքները, ինչպես նաև ջրածնային վտանգի մեղմման առաջարկված այլընտրանքային մեթոդները կիրառելի են ՀԱԷԿ-ի շահագործվող 2-րդ էներգաբլոկում պլանավորվող ջրածնային անվտանգության ապահովման հայեցակարգի մշակման և ներդրման աշխատանքներում:

Պաշտպանության ներկայացվող հիմնական դրույթները:

1. ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկի հերմետիկ շինության ֆիզիկական ամբողջականությանը սպառնացող ջրածնի սահմանային քանակության գնահատման հաշվարկային մեթոդիկան և դրա հիման վրա իրականացված գնահատման արդյունքները:
2. Հնարավոր ծանր վթարի զարգացման պայմաններում ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկի հերմետիկ գոտու պատերին ջրային գոլորշու կոնդենսացման հետևանքով ջրածին-օդ-ջրային գոլորշի խառնուրդի այրվող կազմի ձևավորման վտանգի գնահատման հաշվարկային մեթոդիկան և դրա հիման վրա իրականացված գնահատման արդյունքները:
3. ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկներում ՋՊԱՌ-ի ներդրման խնդիրների հետազոտման արդյունքները:
4. Ծանր վթարի դեպքում ջրածնային վտանգի մեղմման մշակված այլընտրանքային մեթոդները:
5. Ջրածնի մոնիտորինգի համակարգի պահանջվող բնութագրերի հետազոտման արդյունքները:

Փորձաքննությունը և հրատարակված աշխատանքները: Իրականացված հետազոտության հիմնական դրույթները և արդյունքները զեկուցվել և քննարկվել են ՀԱՊՀ «Ջերմաէներգետիկա և շրջակա միջավայրի պաշտպանություն» ամբիոնի գիտական սեմինարներում և ամենամյա տարեկան գիտաժողովներում (2015-2018թթ.), Ատոմային Էներգետիկայի Միջազգային Գործակալության կողմից կազմակերպած «Hydrogen Management in Severe Accidents» թեմայով գիտատեխնիկական սեմինարում (Վիեննա, 25-28 սեպտեմբերի, 2018թ.): Ատենախոսության թեմայով հրատարակված է 9 գիտական հոդված, այդ թվում երկուսը ԲՈԿ-ի կողմից հատուկ խրախուսվող «Scopus» շտեմարանում ընդգրկված միջազգային հեղինակավոր ամսագրում: Ատենախոսության թեմայով հրատարակված գիտական հոդվածների ցանկը բերված է սեղմագրի վերջում:

Ատենախոսության կառուցվածքը և ծավալը: Ատենախոսությունը բաղկացած է ներածությունից, օգտագործված հապավումների ցանկից, հինգ գլխից, հիմնական եզրակացություններից, 104 անուն գրականության ցանկից և 1 հավելվածից: Ատենախոսության ընդհանուր ծավալը կազմում է 126 էջ՝ այդ թվում մեկ հավելված (1 էջ), 35 նկար և 8 աղյուսակ:

ԱՇԽԱՏԱՆՔԻ ՀԱՄԱՌՈՏ ԲՈՎԱՆԴԱԿՈՒԹՅՈՒՆԸ

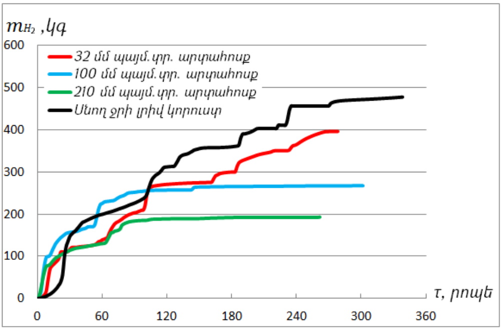
Ներածությունում հիմնավորվել է ատենախոսության արդիականությունը, ձևակերպվել է հետազոտության նպատակը, ներկայացվել են գիտական արդյունքները և նորույթը, ստացված արդյունքների գործնական նշանակությունը, պաշտպանության հիմնական դրույթները, շարադրված է ատենախոսության համառոտ բովանդակությունը:

Առաջին գլխում իրականացվել է թեմայի հետ առնչվող գրականության համակողմանի վերլուծություն, որի արդյունքում ակնհայտ են դարձել ԱԷԿ-ներում ծանր վթարների դեպքում ջրածնի առաջացման, ջրածնի այրման ռեժիմների և դրանց վրա ազդող գործոնների, ինչպես նաև ջրածնային վտանգի մեղմման մեթոդների կիրառման խնդիրները՝ հաշվի առնելով ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով ԱԷԿ-ների նախագծային առանձնահատկությունները: Ելնելով եղած գիտական գրականության վերլուծության արդյունքների ընդհանրացումից և վեր հանված բաց հարցերից, աշխատանքի հիմքում դրվել են հետևյալ **խնդիրները**.

- ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկներում ծանր վթարների դեպքում ջրածնային վտանգի հետազոտման տեսանկյունից առավել բնութա-գրական վթարային սցենարների բացահայտում, և հերմետիկ շինության ամբողջականությանը սպառնացող ջրածնի սահմանային քանակության հաշվարկային գնահատում,
- ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկներում ծանր վթարի արտաիրանային փուլում պայթյունավտանգ գազային խառնուրդի ձևավորման վտանգի գնահատում,
- ծանր վթարի դեպքում ջրածին-շոգեօդային խառնուրդի այրվող կազմի ձևավորման վտանգի վրա հերմետիկ գոտու պատերին ջրային գոլորշու կոնդենսացման պրոցեսների ազդեցության հետազոտում,
- ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկների ծանր վթարների կառավարման խնդիրների համատեքստում ջրածնի մոնիտորինգի համակարգի պահանջվող բնութագրերի հետազոտում,
- ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկներում ծանր վթարների դեպքում ՋՊԱՌ-ի ներդրման խնդիրների համակողմանի հետազոտում, և ջրածնային վտանգի մեղմման այլընտրանքային մեթոդների մշակում:

Երկրորդ գլխում կատարվել է ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկներում ծանր վթարի ներիրանային և արտաիրանային փուլերում ջրածնի առաջացման դինամիկայի համեմատական վերլուծություն, մշակվել է հաշվարկային մեթոդիկա, որով գնահատվել է հերմետիկ շինության ամբողջականությանը սպառնացող ջրածնի սահմանային քանակությունը:

Նկ.1-ում ամփոփված է ջրածնի առաջացման տեսանկյունից որակապես տարբերվող ծանր վթարային սցենարների դեպքում ռեակտորում ջրածնի առաջացման դինամիկան (հաշվարկները կատարվել են ՀԱԷԿ-ի շահագործվող 2-րդ էներգաբլոկի օրինակով, MELCOR 1.8.5 երկչափ հաշվարկային կոդով):



Նկ. 1 Ջրածնի առաջացման դինամիկան դիտարկված վթարային սցենարների դեպքում (ծանր վթարի զարգացման ներիրանային փուլ)

Նկ.1-ում բերված արդյունքների վերլուծությունից պարզ է դարձել, որ հերմետիկ գոտու ամբողջականությանը սպառնացող ջրածնային վտանգի ուսումնասիրության տեսանկյունից բնութագրական վթարներ կարելի է համարել առաջին կոնտուրի ջերմատարի «փոքր» և «միջին» արտահոսքով վթարները, ինչպես նաև առանց առաջին կոնտուրի սահմանների խզման ծանր վթարները՝ սնող ջրի լրիվ կորստով վթարի օրինակով:

Հերմետիկ շինության ֆիզիկական ամբողջականությանը սպառնացող ջրածնի սահմանային քանակության գնահատման համար մշակվել է հաշվարկային մեթոդիկա՝ ամերիկյան Westinghouse կազմակերպության մշակած մեթոդաբանության ներառումով: Հաշվարկը իրականացված է Excel ծրագրային փաթեթով, և կրել է իտերացիոն բնույթ: Խնդիրը բերվել է հերմետիկ շինության ներսում ռիսկային պայմանների ստուգմանը, որը հիմնված է ջրածնի այրումից առաջ և հետո գազային միջավայրի վիճակի հավասարումների համակարգի վրա (1):

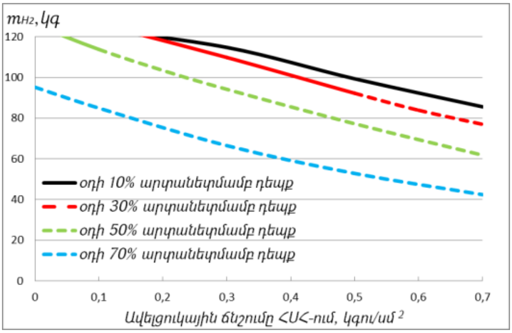
$$\begin{cases} P\cdot V = n_1\cdot R\cdot T_{սահմ} \\ P_{սահմ}\cdot V = n_2\cdot R\cdot (T_{սահմ}+\Delta T) \end{cases} \qquad (1)$$

որտեղ P-ն մինչև ջրածնի այրումը միջավայրի բացարձակ ճնշումն է, *Պա*, V-ն հերմետիկ գոտու ազատ ծավալն է, *մ³*, R-ը ունիվերսալ գազային հաստատունը, *Ջ/(մոլ·կգ)*, $P_{սահմ}$-սահմանային ճնշումն է, Պա, n_1 –ը և n_2-ը համապատասխանաբար ջրածնի այրումից առաջ և հետո միջավայրի մոլյար քանակությունն է, *մոլ*, $T_{սահմ}$ –ը սահմանային ճնշմանը համապատասխանող բացարձակ ջերմաստիճանն է (որոշվել է իտերացիոն սկզբունքով), *Կ*, ΔT –ն համապատասխան զանգվածով ջրածնի այրումից հետո ջերմաստիճանի միջին աճն է, *Կ,* որը որոշվում է ելնելով ջրածնի այրումից անջատված և միջավայրին հաղորդված ջերմային բալանսի հավասարումից (2):

$$Q_{H_2}\cdot m^{H_2}_{սահմ} = \left(C_{H_2O} + C_{օդ}\right)\cdot \Delta T \qquad (2)$$

որտեղ $m^{H_2}_{սահմ}$ -ը ջրածնի սահմանային քանակությունն է, *կգ,* որի այրումը կհանգեցնի հերմետիկ շինության ֆիզիկական ամբողջականության կորստին (նմանատիպ հաշվարկներում Q_{H_2}-ի արժեքը ընդունվում է 238000 *Ջ/մոլ*), C_{H_2O}, $C_{օդ}$-ը համապատասխանաբար ջրային գոլորշու և օդի լրիվ զանգվածային ջերմունակությունն է, *Ջ/°C:*

Հաշվարկի արդյունքները ամփոփված են նկ.2- ում (ընդհատվող գծերով տիրույթը կազմող կետերը համապատասխանում են իներտ միջավայրին, իսկ հոծ գծերով տիրույթի կետերը՝ հնարավոր այրման վիճակներին): Որպես իներտության չափորոշիչ կիրառվել է ջրային գոլորշու 55% և բարձր ծավալային կոնցենտրացիան: Հաշվարկի մեջ հաշվի է առնվել միջավայրի իներտ կամ այրվող լինելու հանգամանքը և օդի սկզբնական արտանետման չափը:



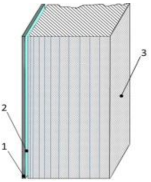
Նկ. 2 Հերմետիկ շինության ֆիզիկական ամբողջականությանը սպառնացող ջրածնի սահմանային քանակությունը օդի արտանետման տարբեր դեպքերի համար

Համաձայն ստացված արդյունքների՝ մոտավորապես 80…85 *կգ* ջրածնի այրումը (դեֆլագրացիոն այրման դեպքում) կարող է բերել հերմետիկ շինության ամբողջականության խախտմանը, որը ծանր վթարի ընթացքում առաջացող ջրածնի զանգվածի համեմատաբար փոքր մասն է կազմում (նկ.1), հետևաբար, ջրածնի հնարավոր բռնկման դեպքում հերմետիկ սարահների համակարգի մասնակի կամ լրիվ ամբողջականության կորուստի (քանդման) վտանգը կարելի է գնահատել չափազանց բարձր:

Երկրորդ գլխում կատարվել է նաև ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկներում ծանր վթարի արտաիրանային փուլում պայթյունավտանգ գազային խառնուրդի ձևավորման վտանգի գնահատում: Հաշվի առնելով, որ ի տարբերություն ներիրանային փուլի արտաիրանային փուլում ջրածնի առաջացման դինամիկան կախված չէ կոնկրետ վթարային սցենարից՝ 32 *մմ* պայմանական տրամագծով արտահոսքով և վթարային լրասնուցման համակարգի խափանմամբ վթարային սցենարի օրինակով հիմնավորվել է, որ միակ ռացիոնալ եղանակը, որով հնարավոր կլինի կանխել արտաիրանային փուլում պայթյունավտանգ գազային խառնուրդի ձևավորումը՝ թթվածնի ցածր կոնցենտրացիայի ապահովումն է (<5*%*), ինչը ենթադրում է ծանր վթարի ներիրանային փուլում թթվածնի քանակության նվազեցման միջոցառումների անհրաժեշտություն:

<u>Երրորդ գլխում</u> մանրամասն ուսումնասիրվել է ծանր վթարի դեպքում հերմետիկ գոտու պատերի ջերմահեռացման ընդունակության ազդեցությունը ջրային գոլորշու կոնդենսացման պրոցեսների և դրանով պայմանավորված ջրածին-շոգեօդային խառնուրդի այրվող կազմի ձևավորման վտանգի վրա:

Հետազոտությունների իրականացման նպատակով երկաթբետոնյա պատով ջերմության հաղորդման և դրանում ջերմաստիճանային բաշխվա-ծության դինամիկան մոդելավորելու համար՝ երկաթբետոնյա պատը, որը տվյալ դեպքում ունի 80 *սմ* հաստություն, բաժանվել է 11 շերտերի (նկ.3), որոնց հաստությունները համապատասխանաբար ընդունվել են 2,3,5,5,5,10,10,10,10,10,10 *սմ*, իսկ օդային բացակի չափը ընդունվել է 2 *մմ*:



Նկ.3 Պատի սխեմատիկ կառուցվածքը
1.-մետաղական երեսպատվածք 2.-օդային բացակ
3.-երկաթբետոնյա պատ

Համեմատական հետազոտությունների իրականացման համար, օգտագործվել են կոնդենսացիոն ջերմատվության գործակցի որոշման Դեբիի (3) և Ուչիդաի (4) կողմից ստացված ստորև ներկայացված էմպիրիկ կախվածությունները.

$$\alpha = \frac{L^{0,05} \cdot [(3,7 + 28,7 \cdot P_{\text{խառ}}) - (2483 + 458,3 \cdot P_{\text{խառ}}) \cdot \log \eta]}{(t_{\text{խառ}} - t_{\text{մետ}})^{0,25}} \tag{3}$$

$$\alpha = 380 \cdot \left(\frac{\eta}{1-\eta}\right)^{-0,7} \tag{4}$$

որտեղ α - ն՝ կոնդենսացիոն ջերմատվության գործակիցն է, *Վտ/(մ²·Կ)*, $t_{\text{խառ}}$ –ը՝ շոգեգազային խառնուրդի միջին ջերմաստիճանը, *°C*, $t_{\text{մետ}}$ –ը՝ մետաղական երեսպատվածքի ջերմաստիճանը, *°C*, η –ն՝ չկոնդենսացող գազերի զանգվածային մասնաբաժինն է, L –ը՝ կոնդենսացման մակերևույթի բնութագրական չափն է, *մ*, $P_{\text{խառ}}$- ը՝ շոգեգազային խառնուրդի ճնշումն է, *ՄՊա*:

Ջրային գոլորշու կոնդենսացման ինտենսիվությունը որոշվում է ըստ ստորև ներկայացված հավասարման.

$$m_{\text{կ}} = \alpha \cdot \frac{t_{\text{խառ}} - t_{\text{մետ}}}{r} \tag{5}$$

որտեղ $m_{\text{կ}}$– ը՝ ջրային գոլորշու կոնդենսացման ինտենսիվությունն է (վերագրված միավոր մակերեսին), *կգ/վ/մ²*, r – ը՝ թաքնված ջերմաքանակը, *Ջ/կգ*:

Մետաղական երեսպատվածքից օդային բացակով բետոնի արտաքին մակերևույթին ջերմության հաղորդման պրոցեսի մոդելավորման համար օգտագործվել է ջերմահաղորդականության համարժեք գործակիցը.

$$q_{\text{մետ-բետ}} = (t_{\text{մետ}} - t_{\text{բետ}}) \cdot \lambda_{\text{համ}} / \delta_{\text{օդ}} \tag{6}$$

$$\lambda_{\text{համ}} = \lambda_{\text{միջ}} \cdot \varepsilon_{\text{կ}} \tag{7}$$

որտեղ $q_{\text{մետ-բետ}}$-ն՝ մետաղական երեսպատվածքից բետոնի մակերևույթին ջերմային հոսքի խտությունն է, *Վտ/մ²*, $t_{\text{մետ}} - t_{\text{բետ}}$- ը՝ ջերմաստիճանային տարբերությունն է մետաղական երեսպատվածքի և բետնյա պատի մակերևույթների միջև, $\delta_{\text{օդ}}$ –ը՝ օդային բացակի հաստությունն է, *մ*, $\lambda_{\text{համ}}$ –ը՝ ջերմահաղորդականության համարժեք գործակիցն է, *Վտ/(մ·°C)*, $\varepsilon_{\text{կ}}$ –ն՝ կոնվեկցիայի գործակիցն է, որը մոտավորապես որոշվում է համաձայն հետևյալ արտահայտության.

$$\varepsilon_{\text{կ}} = 0,18 \cdot (Gr \cdot Pr)_{\text{միջ}}^{0,25}, \tag{8}$$

որտեղ $(Gr \cdot Pr)_{\text{միջ}} = g \cdot \beta_{\text{միջ}} \cdot (t_{\text{մետ}} - t_{\text{բետ}}) \cdot \delta_{\text{օդ}}^{3} \cdot Pr_{\text{միջ}} \cdot \nu_{\text{միջ}}^{-2}$, $\beta_{\text{միջ}} = \frac{1}{t_{\text{մետ}} + 273}$,

$Pr_{\text{միջ}}$- *ը* Պռանդլի չափում չունեցող կրիտերիան է, $Gr_{\text{միջ}}$ –*ը* Գռասհովի չափում չունեցող կրիտերիան է, $\nu_{\text{միջ}}$ -*ը* կինեմատիկ մածուցիկությանը, *մ²/վ:*

Մետաղական երեսպատվածքի ընթացիկ ջերմաստիճանի որոշման համար օգտագործվել է հետևյալ արտահայտությունը.

$$t_{\text{մետ}}^{k} = t_{\text{մետ}}^{k-1} + \frac{q_{\text{կ}} - q_{\text{մետ-բետ}}}{m_{\text{մետ}} \cdot c_{\text{մետ}}} \tag{9}$$

որտեղ $t_{\text{մետ}}^{k}$-ը՝ մետաղական երեսպատվածքի ընթացիկ ջերմաստիճանն է *°C*, $t_{\text{մետ}}^{k-1}$ –ը՝ մետաղական երեսպատվածքի ջերմաստիճանը նախորդ հաշվարկային քայլում *°C*, $m_{\text{մետ}}$-ը՝ զանգվածը (վերագրած միավոր մակերեսին), *կգ*, $c_{\text{մետ}}$-ը՝ տեսակարար ջերմունակությունը, *Ջ/(կգ·Կ)*, $q_{\text{կ}}$ - ն՝ ջերմային հոսքի խտությունն է պայմանավորված ջրային գոլորշու կոնդենսացման երևույթով, *Վտ/մ ²*, որը որոշվում է ստորև ներկայացված հայտնի հավասարման համաձայն.

$$q_{\text{կ}} = m_{\text{կ}} \cdot r \tag{9}$$

Դիտարկվող հաշվարկային ծավալի միջավայրում գազային բաղադրիչների զանգվածային մասնաբաժինները որոշվել են համաձայն հետևյալ արտահայտության.

$$g_i = m_i / m_{\text{խառ}} \tag{10}$$

որտեղ m_i-ն՝ գազային խառնուրդում առանձին գազային բաղադրիչի ընթացիկ զանգվածն է, *կգ*, $m_{\text{խառ}}$ -ը՝ գազային խառնուրդի ընթացիկ զանգվածը, *կգ*:

Գազային բաղադրիչների ծավալային մասնաբաժինները որոշվել են համաձայն հետևյալ արտահայտության.

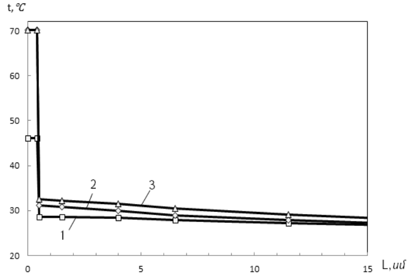
$$\varphi_i = g_i \cdot R_i / R_{խառն} \qquad (11)$$

որտեղ R_i-ն՝ առանձին բաղադրիչների գազային հաստատունն է (որոշվում է համաձայն տեղեկատուների), $R_{խառն}$ -ը խառնուրդի գազային հաստատունն է, որը որոշվել է ըստ հետևյալ արտահայտության.

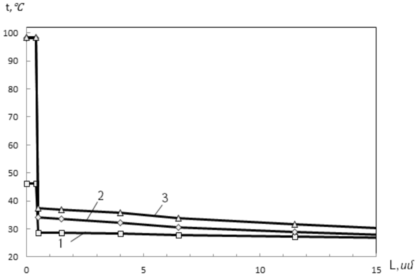
$$R_{խառն} = \sum g_i \cdot R_i \qquad (12)$$

Հաշվարկային գնահատումները իրականացվել են նկարագրված հաշվարկային մեթոդիկայի հիման վրա՝ SWING editor ծրագրային փաթեթի օգնությամբ, որը թույլ է տալիս իրականացնել ցանկացած ոչ ստացիոնար պրոցեսի մոդելավորում:

Հիմնվելով ներկայացված հաշվարկային մեթոդիկայի վրա մանրամասն հետազոտվել է պատի ջերմահեռացման ընդունակությունը շոգեգազային խառնուրդում ջրային գոլորշու համեմատաբար ցածր և բարձր պարունակությամբ դեպքերում: Համաձայն նկ.4-ում ամփոփված արդյունքների, բետոնի մակերևույթի ջերմաստիճանի աճը տեղի է ունենում շատ դանդաղ, ուստի հնարավոր ծանր վթարի զարգացման ընթացքում հերմետիկ գոտու պատերի ջերմընկալման ունակությունը և դրանով պայմանավորված ջրային գոլորշու կոնդենսացման պրոցեսը կունենա երկարատև պահպանման միտում՝ էապես ազդելով շոգեգազային խառնուրդի կազմի վրա:



ա.)

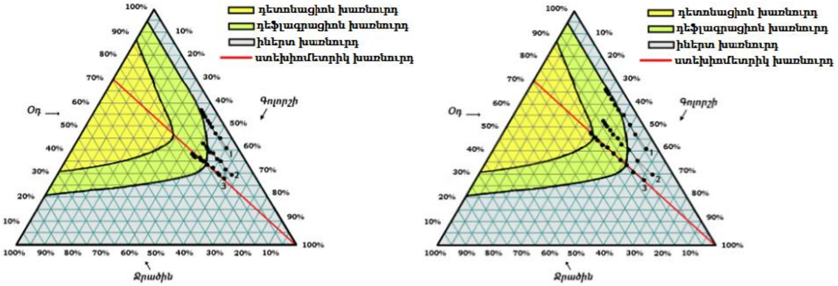


բ.)

Նկ.4. Ջերմաստիճանային բաշխվածությունը մետաղական երեսպատվածքում և երկաթբետոնյա պատի ներքին շերտերում (ջրային գոլորշու համեմատաբար ցածր (ա.) և բարձր (բ.) պարունակությամբ հաշվարկային դեպքեր) 1- ջերմատարի արտահոսքով վթարի մեկնարկի պահին; 2 –վթարի սկզբից 1 ժամ հետո; 3 - վթարի սկզբից 3 ժամ հետո

Շոգեգազային խառնուրդի այրվող կազմի ձևավորման վտանգի վրա կոնդենսացման պրոցեսների ազդեցության գնահատման համար ընտրվել են ըստ մակերես-ծավալ հարաբերակցությամբ (S/V) որակապես տարբեր սրահներ, իսկ միջավայրի սկզբնական կոնցենտրացիոն կազմը ընտրվել է գոլորշու բարձր պարունակությամբ, ինչը բավարարում է միջավայրի իներտության կրիտերիային (>55%): Ջրածնի սկզբնական պարունակությունը ընտրվել է համեմատաբար ցածր կոնցենտրացիաների տիրույթում (4, 8 և 12%), որը առավել բնութագրական կորող է լինել ակտիվ գոտում վառելիքի ոչ զգալի վնասմամբ վթարային սցենարների դեպքում կամ ծանր վթարի կառավարման համապատասխան միջոցառումների իրագործման պայմանների համար:

Դիտարկվող բոլոր 3 հաշվարկային դեպքերում, որոնք առանձնանում են ջրածնի սկզբնական կոնցենտրացիայով, միջավայրի կոնցենտրացիոն կազմի փոփոխության դինամիկան ցույց է տրված Շապիրո-Մոֆետտիի դիագրամներում (նկ.5):



ա.) բ.)

Նկ. 5. S/V=0,9 (ա.) և S/V=1,9 (բ.) հաշվարկային դեպքերում միջավայրի կազմի փոփոխությունը (1,2,3–հիմնական սրահում ջրածնի հարաբերական կոնցենտրացիայի համապատասխանաբար 4, 8, և 12% սկզբնական պարունակությամբ դեպքեր)

Միջավայրի կոնցենտրացիոն վիճակը որոշող կետերը վերցված են 10 *րոպե* հաճախականությամբ (երկաթբետոնյա պատում ջերմաստիճանային բաշխվածությունը համապատասխանում է ջրային գոլորշու համեմատաբար ցածր պարունակությամբ հաշվարկային դեպքին (նկ.4 ա.-կոր 2)):

Համեմատաբար փոքր մակերես-ծավալ հարաբերակցությամբ սրահի դեպքում (S/V=0,9) միջավայրի կոնցենտրացիոն կազմի փոփոխությունը տեղի է ունենում համեմատաբար դանդաղ (նկ. 5 ա.) և դիտարկվող ժամանակային տիրույթում (90 *րոպե*) վտանգավոր կազմի ձևավորումը տեղի է ունենում միայն ջրածնի համեմատաբար բարձր սկզբնական պարունակությամբ (12*%*) հաշվարկային դեպքում, իսկ համեմատաբար մեծ մակերես-ծավալ հարաբերակցությամբ սրահի դեպքում (S/V=1,9), ջրածնի համեմատաբար բարձր սկզբնական պարունակությամբ դեպքերում (8…12*%*), գոլորշու կոնդենսացման հետևանքով միջավայրի հնարավոր այրվող կազմի ձևավորումը տեղի է ունենում հաշվարկի սկզբից ընդամենը 20 րոպե հետո, իսկ դետոնացվող խառնուրդի ձևավորումը՝ 90 րոպե հետո (նկ. 5 բ.):

Ստացված հաշվարկային արդյունքների համեմատական վերլուծությունից պարզ է դառնում, որ մեծ մակերես-ծավալ հարաբերակցությամբ ծավալով սրահների դեպքում գոյություն ունի միջավայրի իներտության համեմատաբար արագ կորստի վտանգ կապված պատերին գոլորշու կոնդենսացման պրոցեսի հետ: Ուստի ծանր վթարի դեպքում հերմետիկ շինության հիմական սրահի հարակից փոքր սրահներում, ջրածնային վտանգի մեղմման համապատասխան տեխնիկական համակարգերի կամ միջոցառումների բացակայության դեպքում գոյություն կունենա ջրածնի դետոնացիոն այրման վտանգ, անկախ հիմնական ծավալում շոգեգազային միջավայրի վիճակից, ինչը չափազանց կարևոր գործոն է ջրածնային վտանգի մեղմման մեթոդների ընտրության և մշակման խնդիրների համատեքստում:

<u>Չորրորդ գլուխում</u> հետազոտվել է ՋՊԱՌ-ի ներդրման խնդիրները ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով ԱԷԿ-ներում և ելնելով դրանց ներդրման արձանագրված լուրջ սահմանափակումներից մշակվել են ջրածնային վտանգի մեղմման այլընտրանքային մեթոդներ:

Ժամանակակից էներգաբլոկներում և ՀԱԷԿ-ի շահագործվող 2-րդ էներգաբլոկում հնարավոր ծանր վթարների դեպքում ՋՊԱՌ-ի սպասվող արտադրողականության տիրույթների գնահատման նպատակով հաշվարկային եղանակով դիտարկվել են առավել մեծ տարածում ունեցող 3 տարբեր արտադրողների ՋՊԱՌ (արտադրողներ AECL, AREVA, NIS), որոնց արտադրողականության որոշման համար օգտագործված մաթեմատիկական կախվածությունները ներկայացված են ստորև.

$$\dot{r}_{H_2} = (0{,}15196 \cdot C_{H_2} + 0{,}0126 \cdot C_{H_2}{}^{2}) \cdot (198/T)^{1{,}10974} \cdot P^{0{,}57769} \quad [կգ/ժ] \qquad (13)$$

$$\dot{r}_{H_2} = \eta \cdot min(C_{H_2}, 2 \cdot C_{O_2}, 8) \cdot (A \cdot p + B) \cdot tanh(C_{H_2} - 0{,}5) \quad [գ/վ] \qquad (14)$$

$$\dot{r}_{H_2} = 1{,}134 \cdot C_{H_2}^{\;1{,}307} \cdot (P/RT) \quad [գ/վ] \qquad (15)$$

որտեղ $\dot{r}_{H_2}$ – ը ջրածնի ռեկոմբինացիայի զանգվածային ինտենսիվությունն է, P-ն՝ միջավայրի ճնշումը, *բար*, T-ն՝միջավայրի բացարձակ ջերմաստիճանը *Կ*, R-ն՝ ունիվերսալ գազային հաստատունը, η-ն՝ ռեկոմբինատորի արդյունավետությունը տվյալ պայմաններում, C_{H_2}–ը՝ ջրածնի ծավալային կոնցենտրացիան ռեկոմբինատորի մուտքում,*%*, C_{O_2}–ը՝ թթվածնի ծավալային կոնցենտրացիան ռեկոմբինատորի մուտքում,*%*, A-ն և B–ն՝ փորձնականորեն ստացված հաստատուններ են:

Ռեկոմբինատորների արդյունավետությունը պայմանավորված է ջրածնի և թթվածնի հարաբերակցությամբ, որի թվային արժեքը (14)-ում որոշվել է՝ համաձայն հետևյալ տրամաբանության.

$$\eta = \begin{cases} 1 & եթե \quad C_{H_2}/C_{O_2} \le 1 \\ 0{,}5 & եթե \quad C_{H_2}/C_{O_2} > 1 \end{cases} \qquad (16)$$

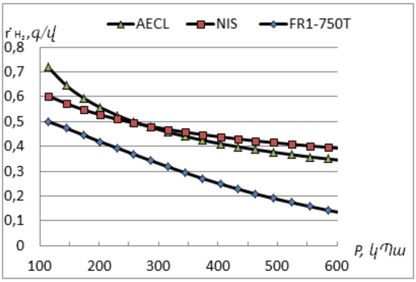
Ջրածնի ռեկոմբինացիայի պրոցեսի սկսվելը տեղի է ունեցել՝ $C_{H_2} \geq 0{,}5\ \%$ պայմանի իրագործման դեպքում:

Հաշվարկները կատարվել են Excel ծրագրային փաթեթով: Համեմատական վերլուծություն իրականացնելու համար սահմանվել է միջավայրի կազմի որակապես տարբերվող համախումբ: Միջավայրի կազմի սահմանման ժամանակ հաշվի է առնվել իրականում սպասվող պարամետրերի տիրույթը՝ ելնելով հետևյալից.

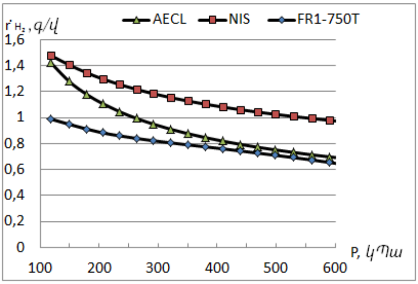
- օդի քանակությունը համապատասխանում է նորմալ շահագործման պայմանների վիճակին (ծանր վթարի սկզբնական փուլ),
- ջրային գոլորշու քանակությունը փոփոխվում է լայն տիրույթում՝ ապահովելով հերմետիկ սրահներում ճնշման մեծության փոփոխություն մթնոլորտայինից մինչ առավելագույն սպասվող արժեքը՝ 600 *կՊա*,
- ջրածնի քանակության համար ընտրվել են 2 արժեքներ, որոնց ցածր ջերմաստիճանների տիրույթում (323 *Կ*), համապատասխանում են պարցիալ ճնշման 4 և 8 *կՊա* մեծությունները:

Հիմնավորված է, որ ջրածնի կոնցենտրացիան 8*%* մեծությամբ սահմանափակելը կարելի է առաջին մոտավորությամբ համարել ՋՊԱՌ-ի ներդրման նպատակային չափորոշիչ, որի դեպքում դրանց աշխատանքը չի հանգեցնի ջրածնի ինքնաբռնկման վտանգի մեծացմանը: Հաշվի առնելով վերոնշյալը, տվյալ աշխատանքի շրջանակներում կատարված հաշվարկային գնահատումների ժամանակ դիտարկվել է ջրածնի կոնցենտրացիայի մինչ 8*%* տիրույթը:

Նկ.6-ում ներկայացված են հաշվարկների արդյունքները՝ ջրածնի պարցիալ ճնշման 4 *կՊա* (տարբերակ 1) և 8 *կՊա* (տարբերակ 2) մեծությունների դեպքում:



տարբերակ 1.

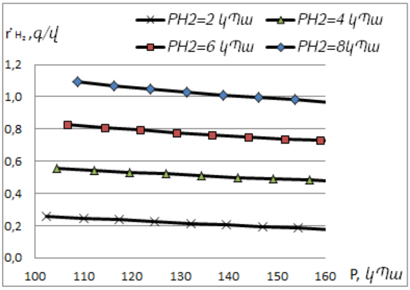


տարբերակ 2.

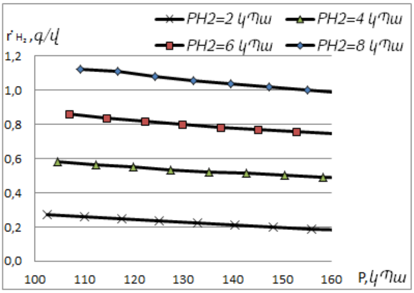
Նկ.6. Դիտարկված տեսակի ռեկոմբինատորների արտադրողականության կախվածությունը ճնշումից (ջրածնի պարունակության 2 տարբերակների դեպքում)

Նկ.6-ում բերված արդյունքների համեմատական վերլուծությունից պարզ է դառնում, որ ճնշման նվազեցումը կարող է հանգեցնել ջրածնի ռեկոմբիացիայի պրոցեսի ինտենսիվության զգալի աճին (դիտարկված մոդելի ՋՊԱՌ-ի արտադրողականության փոփոխությունը շոգեգազային խառնուրդի ճնշման յուրաքանչյուր 100 *կՊա* փոփոխման հետևանքով կազմում է շուրջ 20%):

Նկ.7-ում ներկայացված է AREVA կազմակերպության կողմից արտադրվող FR1-750T տիպի ռեկոմբինատորի արտադրողականության փոփոխությունը միջավայրի այնպիսի ճնշման տիրույթի համար, որը առավել բնութագրական է ՋՋԷՌ-440 տիպի ռեակտորներով էներգաբլոկների հերմետիկ գոտու համար: Առավել բնութագրական արդյունքների ստացման նպատակով հաշվարկները կատարվել են միջավայրի սկզբնական 2 տարբեր վիճակներին համապատասխանող տարբերակների համար (միջավայրի սկզբնական պայմաններն ընտրվել են օդի սկզբնական քանակի 20% (նկ.7 տարբերակ 1.) և 60% (նկ.7 տարբերակ 2.) արժեքների դեպքում), իսկ ջրածնի սկզբնական քանակությունները ընդունվել են համապատասխանաբար 2, 4, 6 և 8 *կՊա*:



տարբերակ 1.



տարբերակ 2.

Նկ.7 Ռեկոմբինացիայի ինտենսիվության կախվածությունը ճնշումից միջավայրի տարբեր սկզբնական պայմանների դեպքում

Համեմատելով նկ.7-ում ներկայացված ջրածնի ռեկոմբինացիայի ինտենսիվության արդյունքները, ակնհայտ է դառնում, օդի սկզբնական քանակության փոփոխությունը էական ազդեցություն չունի ռեկոմբինատորի սպասվող արտադրողականության վրա: Համադրելով նկ.6-ում և նկ.7-ում բերված արդյունքները, պարզ է դառնում, որ ինչպես ժամանակակից էներգաբլոկներում, այնպես էլ առաջին սերնդի էներգաբլոկներում ռեկոմբինատորների սպասվող արտադրողականության արժեքները (ճնշման 100…160 *կՊա* միջակայքում) գտնվում են գրեթե միննույն տիրույթում, սակայն ցածր ճնշման տիրույթում դրանց արտադրողականության կարգավորման հնարավորությունը ջրային կոլորշով գործնականում նպատակահարմար չի լինի:

Փոքր նախագծային ճնշմամբ հերմետիկ գոտիով էներգաբլոկներն ունեն մի շարք էական նախագծային առանձնահատկություններ, որոնք անպայման պետք է հաշվի առնել ՋՊԱՌ-ի ներդրումից առաջ: Կոնսերվատիվ գնահատումների համաձայն, միջավայրի իներտ կազմի ապահովման համար (ջրային գոլորշու կոնցենտրացիայի առնվազն 55%) հերմետիկ գոտում հարկավոր կլինի ապահովել մոտ 290 *կՊա* և ավելի բացարձակ ճնշում (օդի սկզբնական չնվազած քանակի դեպքում), ինչը ժամանակակից էներգաբլոկների ճնշող մեծամասնության դեպքում հեշտ լուծելի խնդիր է: Խնդիրը բարդանում է ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկների դեպքում, որոնց հերմետիկ շինությունում նման բարձր ճնշման ապահովումը գործնականում

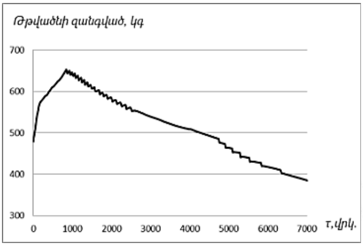
հնարավոր չէ, քանի որ վերջինս սահմանափակվում է արտանետման փականների բացման դրվածքային ճնշմամբ: Ուստի նշված էներգաբլոկների դեպքում ՋՊԱՌ-ի համակարգի ներդրումը ամեն դեպքում կապված կլինի որոշակի ռիսկի հետ, քանի որ ոչ բոլոր ծանր վթարային սցենարների ընթացքում հնարավոր կլինի պահպանել միջավայրի իներտ կազմ: Հետևաբար՝պետք է հաշվի առնել, որ որոշակի պայմանների դեպքում վերջիններս կարող են վերածվել ջրածնի բռնկման աղբյուրի:

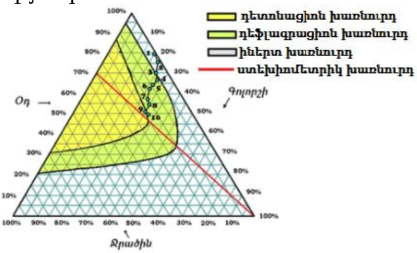
Ելնելով վեր հանված խնդիրներից պարզ է դառնում, որ ծանր վթարի դեպքում ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկների պարագայում ջրածնային վտանգի մեղմման այլընտրանքային մեթոդների մշակումը խիստ անհրաժեշտ է, քանի որ ՋՊԱՌ-ի համակարգերի կիրառումը ունի լուրջ սահմանափակում: Այս պատճառով տվյալ գլխի շրջանակներում խնդիր է դրվել մշակել ջրածնային վտանգի մեղմման այլընտրանքային այնպիսի մեթոդներ, որոնք կարող են նաև համատեղ կիրառվել ՋՊԱՌ-ի համակարգերի հետ:

ՀԱԷԿ-ի շահագործվող 2-րդ էներգաբլոկի հերմետիկ շինության հարմարադասավորման առանձնահատկությունների և ծանր վթարային սցենարների հաշվարկային տվյալների վերլուծության արդյունքում բացահայտվել են այրվող խառնուրդի ձևավորման տեսանկյունից առավել ռիսկային սրահները:

Նկ.8ա.-ում ներկայացված է գլխավոր շրջանառության պոմպերի և գլխավոր փակող փականների (ԳՇՊ-ԳՓՓ) սպասարկման սրահում (որը համարվել է թթվածնի կուտակման տեսանկյունից առավել ռիսկային) թթվածնի զանգվածի փոփոխության կորը (32 *մմ* պայմանական տրամագծով արտահոսքով վթարային սցենար առաջին կոնտուրից, վթարային լրասնուցման համակարգի խափանմամբ և առանձ սպրինկլերային համակարգի աշխատանքի): Հաշվարկում ընդունվել է ԳՇՊ-ԳՓՓ ռետինե ներդիրների անկիպությունների ոչ բարձր արժեք (առանձ պատռման), ինչը այս դեպքում համարվում է կոնսերվատիվ մոտեցում (թթվածնի զանգվածի դանդաղ նվազում՝ առավելագույն արժեքին հասնելուց հետո): Նկ.8ա.-ից հետևում է, որ դիտարկված վթարային սցենարի սկզբնական փուլում թթվածնի կուտակումը դիտարկվող սրահում կարող է հասնել 600…650 *կգ*, իսկ ավելի ուշ, երբ սպասվում է ռեակտորում ջրածնի ինտենսիվ գեներացիա (սկսած 3920 վայրկյանից) և ներհոսք դեպի հերմետիկ շինության ներս, կուտակված թթվածնի զանգվածը գտնվում է 400…500 *կգ* տիրույթում, որի զգալի մասը ճնշման անկման պատճառով կարող է ցանկացած պահի արտանետվել շոգեգեներատորների և գլխավոր շրջանառության պոմպերի (ՇԳ-ԳՇՊ) սրահ (նկ.9բ.): Նշենք, որ յուրաքանչյուր 100 *կգ* թթվածնի արտահոսքը դեպի հերմետիկ շինության վերոնշյալ սրահ կարող է նպաստել թթվածնի միջին կոնցենտրացիայի 0,7…1,2*%* աճին, իսկ թթվածնի տեղային կուտակումը կարող է զգալիորեն գերազանցել նշված տիրույթը, ինչը կարող է նպաստել հերմետիկ գոտու հիմնական ծավալում միջավայրի այրվող կազմի անսպասելի ձևավորմանը, որի կանխումը հնարավոր չէ, անկախ հիմնական սրահում ՋՊԱՌ-ի քանակությունից:

Նկ.8բ.-ում ներկայացված է ԳՇՊ-ԳՓՓ-ների սպասարկման սրահում դիտարկվող վթարային սցենարի դեպքում միջավայրի կազմի փոփոխությունը Շապիրո-Մոֆետտիի դիագրամում, որում միջավայրի կազմը որոշող կետերը վերցված են 20 *րոպե* պարբերականությամբ:





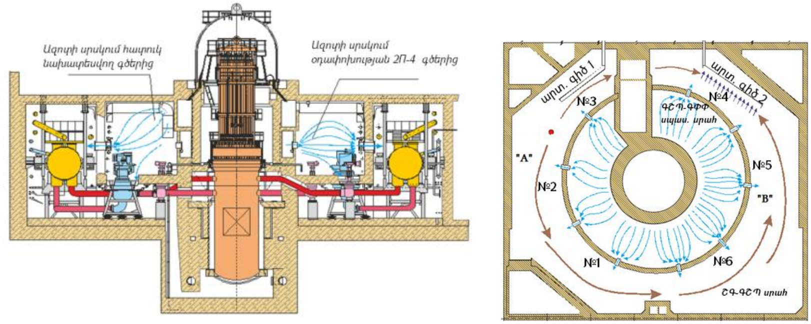
ա.) *բ.)*

Նկ.8 ա.- թթվածնի զանգվածի փոփոխությունը ԳՇՊ -ԳՓՓ սպասարկման սրահի համար, բ.-ԳՇՊ-ԳՓՓ սպասարկման սրահում միջավայրի կազմի փոփոխությունը դիտարկվող վթարային սցենարի դեպքում:

Դիագրամից ակնհայտ է դառնում, որ դետոնացիայի վտանգը ԳՇՊ-ԳՓՓ սպասարկման սրահում դիտարկված ժամանակահատվածում պետք չէ բացառել: Հետևաաբար՝ ԳՇՊ-ԳՓՓ սպասարկման սրահում թթվածնի կուտակման վտանգի կանխումը անպայման պետք է ներառվի ջրածնային վտանգի մեղմման հայեցակարգում:

Հաշվի առնելով կատարված վերլուծությունների արդյունքները մշակվել է ծանր վթարի դեպքում թթվածնի վտանգավոր կուտակման տեսանկյունից առավել ռիսկային սրահից (ԳՇՊ-ԳՓՓ սպասարկման սրահ) թթվածնի հեռացման մեթոդ հիմնված ազոտի սրսկման և միջավայրի կանխամտածված արտանետման վրա: Առաջարկվող մեթոդը պետք է հիմնվի ստորև ներկայացված սկզբունքների վրա.

- ԳՇՊ-ԳՓՓ սպասարկման սրահից կուտակված թթվածնի քանակության նվազեցում (որպես ծանր վթարի դեպքում թթվածնի հնարավոր կուտակման ամենամեծ աղբյուր), որը կարելի է իրականացնել դիտարկվող սրահի կենտրոնական հատվածից ազոտի սրսկման ճանապարհով: Ազոտի սրսկումը կարելի է իրականացնել, ինչպես առանձին գծերի տեղադրման, այնպես էլ կայանի օդափոխության ներհոս գծերից (նկ.9ա):
- առաջին կոնտուրից շոգեգազային միջավայրի արտանետման հետևանքով ստեղծվող ավելցուկային ճնշման հաշվին միջավայրի հեռացում հերմետիկ շինության հիմնական սրահից (հերմետիկ շինությունից ջերմահեռացման կանխամտածված սահմանափակման կամ իսպառ բացակայության պայմաններում):



ա.) *բ.)*

Նկ.9 Միջավայրի հեռացման և ազոտի սրսկման գծերը ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկի հերմետիկ շինությունից: ա.)հերմետիկ գոտու ուղղաձիգ կտրվածք բ.)հերմետիկ գոտու հորիզոնական կտրվածք

Այն դեպքում, եթե նախանշանները ցույց են տալիս, որ վթարային արտահոսքը տեղի է ունենում №2 կամ №3 հովացման օղակներից, ապա արդյունավետ կլինի թողարկել B կիսածավալում գտնվող միջավայրի հեռացման գիծը, №4 կամ №5 հովացման օղակներից արտահոսքի դեպքում համապատասխանաբար A կիսածավալում գտնվող միջավայրի հեռացման գիծը, և այն դեպքում, եթե արտահոսքը տեղի է ունենում №1 կամ №6 հովացման օղակներից, կամ տեղի է ունեցել վթար առանց առաջին կոնտուրի խողովակաշարի պատռման (օրինակ՝ միջավայրի արտանետում ճնշման փոխհատուցիչի պաշտպանիչ փականից), ապա նպատակահարմար կլինի երկու գծերի միաժամանակյա թողարկումը (Նկ.9 բ.):

Այս մեթոդի իրագործման հիմնական նպատակը պետք է հանդիսանա հերմետիկ շինությունում թթվածնի գումարային զանգվածի նվազեցումը մինչև այնպիսի քանակություն, որը խիստ կնվազեցնի կամ կբացառի ջրածնի դետոնացիայի առաջացման վտանգը: Ռազմավարության իրագործման տեսանկյունից հարկավոր է հաշվի առնել ստորև ներկայացված դրույթները.

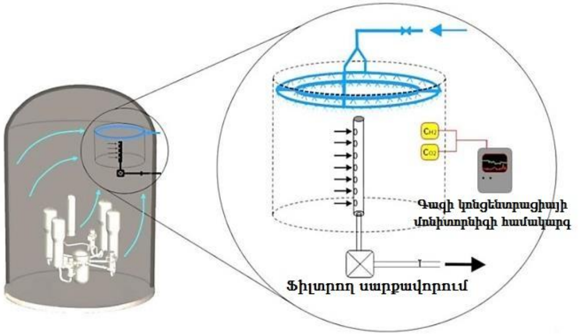
- կոնսերվատիվ գնահատումների համաձայն, հերմետիկ շինության համար վտանգավոր կարող է լինել 80…85 *կգ* ջրածնի այրումը դեֆլագրացիոն ռեժիմով, ինչի համար հարկավոր է առնվազն 640…680 *կգ* թթվածին (ոչ բավարար թթվածնի առկայության դեպքում դեֆլագրացիոն ռեժիմից անցում դետոնացիոն ռեժիմի համարվում է քիչ հավանական):
- կուտակվող թթվածնի քանակությունը հերմետիկ շինության հարակից սրահներում, կոնսերվատիվ մոտեցմամբ պետք է ընդունվի 350 *կգ*, իսկ թթվածնի մնացորդային քանակությունը ՇԳ-ԳՇՊ և ԳՇՊ-ԳՓՓ սպասարկման սրահներում չպետք է գերազանցի 330 *կգ* արժեքը:

Պետք է հաշվի առնել նաև, որ ԳՇՊ-ԳՓՓ սպասարկման սրահ ազոտի սրսկման դադարից անմիջապես հետո հնարավոր է ՇԳ-ԳՇՊ սրահից միջավայրի ներհոսք և ջրածնի կուտակում, իսկ ազոտի սրսկումը կնպաստի նաև դիտարկվող սրահում ջերմաստիճանի զգալի նվազմանը և, հետևաբար, ջրային գոլորշու կոնդենսացման պրոցեսի որոշակի արագացմանը: Այդպիսի պայմաններում մնացորդային թթվածնի առկայությունը կարող է նպաստել վտանգավոր կազմով այրվող խառնուրդի անսպասելի արագ ձևավորմանը:

Վերոնշյալ խնդրից կարելի է խուսափել, եթե ազոտի սրսկումը իրականացվի ստորև նկարագրված երկու հաջորդական փուլերով.

- ազոտի սրսկում մեծ ծախսով (կարճատև), ինչը կնպաստի թթվածնի որոշ մասի արագ արտամղմանը դիտարկվող սրահից,
- ազոտի սրսկում փոքր ծախսով (երկարատև), ինչը կնվազեցնի հարակից սրահներից ջրածնի ներհոսքի վտանգը և միաժամանակ կնպաստի միջավայրից թթվածնի շարունակական հեռացմանը դիտարկվող սրահից:

Պարզ է, որ առաջարկված մեթոդը չի լուծում հերմետիկ գոտու հիմնական ծավալից ջրածնի (թթվաածնի) հեռացումը, և նպատակահարմար է կիրառել միայն թթվածնի կուտակման տեսանկյունից վտանգավոր սրահներում: Հաշվի առնելով տվյալ աշխատանքում վեր հանված ջրածնային վտանգի մեղմման նպատակով ՋՊԱՌ-ի կիրառման սահմանափակումները ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկներում, ինչպես նաև ջրածնային վտանգի մեղմման խնդրի համատեքստում սպրինկլերային համակարգի աշխատանքի սահմանափակումները, մշակվել է ջրածնային վտանգի մեղմման այլընտրանքային մեթոդ, որը կարող է համակցված օգտագործվել ՋՊԱՌ-ի համակարգերի հետ հերմետիկ գոտու հիմնական ծավալում: Առաջարկվող մեթոդի սխեմատիկ դիագրամը ներկայացված է նկ.10-ում:



Նկ.10 Առաջարկվող մեթոդի սխեմատիկ տեսքը:

Հատուկ մշակված և ներդրված սպրինկլերային համակարգը պետք է ծածկի հերմետիկ շինության ծավալի մի փոքր մասը, ի տարբերություն հիմնական սպրինկլերային համակարգի: Սահմանազատված տիրույթում

սպրինկլերային համակարգի աշխատանքով պայմանավորված ջրային գոլորշու կոնդենսացման հետևանքով սպասվում է հերմետիկ գոտու այլ հատվածներից դեպի սահմանազատված ծավալի տիրույթ շոգեգազային հոսքեր: Նման հոսքերի և ջրային գոլորշու շարունակական կոնդենսացման պայմաններում, տեղի կունենա ջրածնի և օդի կոնցենտրացիայի աճ և միաժամանակ ջրային գոլորշու կոնցենտրացիայի նվազում: Սահմանազատված ծավալից միջավայրի արտանետումը իրականացվում է հատուկ ներդրված արտանետման գծերից:

Սահմանազատված տիրույթում ջրային գոլորշու կոնդենսացման և միջավայրի արտանետման պրոցեսները պետք է իրականացվեն հերթափոխմաան տարբերակով: Այսինքն, երբ ջրային գոլորշու կոնդենսացման փուլում ջրածնի կոնցենտրացիան հասնում է տեղային առավելագույն թույլատրելի արժեքին, ցայտեցումը դադարեցվում է և սկսվում է միջավայրի արտանետման պրոցեսը: Ջրածնի հեռացումը իրականացվում է բաժիններով: Հերթափոխումը իրականացվում է մի քանի անգամ, մինչև ջրածին-օդ-ջրային գոլորշի խառնուրդում ջրածնի սահմանային առավելագույն վտանգավոր կազմի ձևավորումը: Հասկանալի է, որ առանց ջրածնի մոնիտորինգի համակարգի առկայության վերևում նկարագրված քայլերի ձեռնարկումը, ինչը ուղղակիորեն կապված է միջավայրի կոնցենտրացիոն կազմի փոփոխության հսկման հետ, հնարավոր չի լինի իրականացնել, ուստի այս համակարգի աշխատանքը պետք է ինտեգրված լինի գազային միջավայրի կոնցենտրացիայի մոնիտորինգի համակարգին:

Առաջարկվող մեթոդի հիմնական առավելություններից կարելի է նշել հետևյալները.

- սպրինկլերային համակարգի աշխատանքի հետևանքով փոփոխման է ենթարկվում միջավայրի կազմը միայն համեմատաբար փոքր տիրույթում, այդպիսով բացառելով ջրածնի գլոբալ այրման վտանգը:
- համակարգը կարող է ապահովել հերմետիկ գոտու միջավայրի աերոզոլների, ինչպես նաև ջերմության հեռացում, ի տարբերություն ՋՊԱՌ-ի համակարգերի, որոնց աշխատանքը ուղեկցվում է զգալի քանակությամբ ջերմության անջատմամբ, ինչը թույլ կտա այն զուգահեռ օգտագործել ՋՊԱՌ-ի համակարգերի հետ՝ փոխհատուցելով հերմետիկ գոտում միջավայրի ջերմային բեռնվածքը:
- համակարգը կարող է ապահովել միջավայրի շատ թե քիչ ուղղորդված հոսք հերմետիկ գոտում՝ նվազեցնելով հերմետիկ գոտու որոշակի մեռյալ գոտիներում ջրածնի կուտակման հավանականությունը:
- համակարգը կարող է ապահովել ոչ միայն ջրածնի, այլ նաև թթվածնի կուտակումը և հեռացումը և այլն:

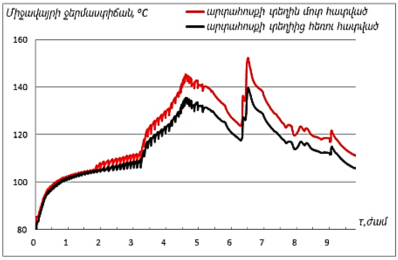
Առաջարկվող մեթոդով ջրածնի հեռացվող զանգվածի վերաբերյալ գաղափար կազմել համար կատարվել են հաշվարկային գնահատումներ: Ջրածնի առավելագույն թույլատրելի կոնցենտրացիան ընդունվել է 8*%*, հաշվի առնելով հնարավոր սխալանքը հաշվարկային գնահատումներում այդ կոնցենտրացիան ընդունվել է 7,5*%*: Հաշվարկային գնահատումները կատարվել են հերմետիկ գոտում բացարձակ ճնշման համապատասխանաբար 1,5, 3 և 5 *բար* ճնշման արժեքների դեպքում: 1,5 *բար* ճնշմամբ հաշվարկային դեպքում, որը առավել բնութագրական է ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկներին, որոնք համալրված են արտանետման փականներով, և ունեն ցածր հերմետիկության ցուցանիշ, հաշվարկները կատարվել են օդի սկզբնական արտանետման համապատասխանաբար 10, 30 և 50*%* դեպքերի համար: 3 և 5 *բար* ճնշմամբ դեպքերը առավել բնութագրական են արևմտյան նախագծի PWR ռեակտորով էներգաբլոկներին: Բոլոր հաշվարկային դեպքերում հերմետիկ գոտու հիմնական ծավալում ջրածնի կոնցենտրացիան ընդունվել է 5*%*: Գնահատումները իրականացվել են 1000 $մ^3$ սահմանազատված ծավալի համար: Համաձայն հաշվարկների արդյունքների P=5 *բար* ճնշմամբ հաշվարկային դեպքում 1000$մ^3$ սահմանազատված ծավալում ջրածին պարունակությունը կազմում է շուրջ 21 *կգ*, մինչդեռ P=1,5

բար ճնշմամբ հաշվարկային դեպքում, կախված օդի սկզբնական արտանետման չափից ջրածնի պարունակությունը կազմում է 7…7,5*կգ*: Հետևաբար ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկների դեպքում նկարագրված համակարգի ներդրումը կլինի համեմատաբար ավելի քիչ արդյունավետ, քան բարձր նախագծային ճնշմամբ էներգաբլոկներում:

<u>Հինգերորդ գլուխում</u> իրականացվել է ջրածնի մոնիտորինգի համակարգերի պահանջվող բնութագրերի համակողմանի ուսումնասիրություն, ելնելով ծանր վթարի դեպքում ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկի հերմետիկ գոտում շոգեգազային միջավայրի պարամետրերի վերլուծությունից:

Ըստ կատարված հետազոտություններ՝ ջրածնի կոնցենտրացիայի չափման պահանջվող միջակայքը պետք է կազմի 0…25%, թթվածնինը՝ 0…18%, ջրային գոլորշունը՝30…70%, ածխածնի մոնօքսիդինը՝ 0…10%: ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկներում հնարավոր ծանր վթարի դեպքում կարելի է սպասել հերմետիկ գոտում միջավայրի կոնցենտրացիոն կազմի շատ արագ փոփոխություն, այդ պատճառով գազային միջավայրի կոնցենտրացիայի չափման տվիչների տվյալների թարմացման պարբերությունը հանդիսանում է ջրածնի մոնիտորինգի համակարգի առավել կարևոր բնութագրերից մեկը, ինչը անպայման պետք է հաշվի առնել ջրածնի մոնիտորինգի համակարգի ընտրության և ներդրման ժամանակ:

Ծանր վթարի դեպքում հերմետիկ գոտու հիմնական ծավալում միջավայրի սպասվող ջերմաստիճանային տիրույթների հետազոտման նպատակով դիտարկվել է առաջին կոնտուրի «տաք» գծից 32 *մմ* պայմանական տրամագծով արտահոսքով վթարային սցենարը: Հաշվարկային արդյունքները ներկայացված են նկ.11-ում:



Նկ.11 ՇԳ-ԳՇՊ ծավալում շոգեգազային միջավայրի ջերմաստիճանը

Հաշվարկները կատարվել են MELCOR 1.8.5 կոդով: Առավել բնութագրական արդյունքների ստացման նպատակով դիտարկվել են երկու տարբերակ՝ հաշվի առնելով արտահոսքի տեղին մոտ և դրանից հեռու հատվածները: Նկ.11-ից հետևում է, որ ՇԳ-ԳՇՊ ծավալում շոգեգազային միջավայրի ջերմաստիճանը կարճաժամկետ գտնվում է 140…150^{o}C տիրույթում և երկարատև ժամանակ գերազանցում է 120…130^{o}C տիրույթը: Ուստի ջերմաստիճանային շեմը, որով պետք է իրականացվի ջրածնի մոնիտորինգի համակարգի տարրերի որակավորում, պետք է ընտրվի բավականին մեծ պաշարով՝ հաշվի առնելով, ինչպես սպասվող ջերմաստիճանները վթարի զարգացման ողջ ընթացքում, այնպես էլ դիտվող պիկային ջերմաստիճանները:

Ամփոփելով կատարված հետազոտությունները կարելի է կատարել հետևյալ հիմնական եզրակացությունները:

ՀԻՄՆԱԿԱՆ ԵԶՐԱԿԱՑՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐ

1. Մշակվել է հաշվարկային մեթոդիկա, որով գնահատվել է ծանր վթարի դեպքում ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկի հերմետիկ շինության ֆիզիկական ամբողջականությանը սպառնացող ջրածնի սահմանային քանակությունը:

2. Հիմնավորվել է, որ ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկների դեպքում ծանր վթարի զարգացման արտաիրանային փուլում պայթյունավտանգ գազային խառնուրդի ձևավորման և դրանով պայմանավորված հերմետիկ շինության քանդման վտանգի կանխման միակ ռացիոնալ եղանակը թթվածնի անվտանգ կոնցենտրացիայի ապահովումն է:
3. Մշակվել է հաշվարկային մեթոդիկա, որով մանրամասն հետազոտվել է ծանր վթարի զարգացման պայմաններում ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկի հերմետիկ գոտու պատերի ջերմահեռացման ընդունակության ազդեցությունը ջրային գոլորշու կոնդենսացման պրոցեսների և ջրածին-օդ-ջրային գոլորշի խառնուրդի այրվող կազմի ձևավորման վտանգի վրա:
4. Հիմնավորվել է, որ ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկներում ծանր վթարների դեպքում ջրածնային վտանգի մեղմման նպատակով ՋՊԱՌ-ի ներդրման հիմնական սահմանափակող գործոն է հանդիսանում վերջիններիս անվտանգ աշխատանքային պայմանների ապահովման բարդությունը, իսկ ՋՊԱՌ-ի արտադրողականության վրա անուղղակի ազդման միակ գործնականորեն իրագործելի եղանակ կարող է հանդիսանալ ջրային գոլորշու կոնցենտրացիայի կարգավորումը:
5. Ծանր վթարների դեպքում այրվող խառնուրդի ձևավորման տեսանկյունից ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկի հերմետիկ գոտու առավել ռիսկային սրահներից մեկի համար մշակվել է ջրածնային վտանգի մեղմման այլընտրանքային մեթոդ՝ հիմնված միջավայրի կանխամտածված արտանետման և ազոտի պարբերական սրսկման վրա:
6. Մշակվել է ծանր վթարների դեպքում ջրածնային վտանգի մեղմման այլընտրանքային մեթոդ՝ հիմնված շոգեգազային խառնուրդից ջրային գոլորշու կոնդենսացման միջոցով հերմետիկ գոտու առանձին տիրույթում ջրածնի և թթվածնի կուտակման և այդ տիրույթից դրանց հեռացման վրա:
7. Իրականացվել է ջրածնի մոնիտորինգի համակարգի պահանջվող բնութագրերի համակողմանի ուսումնասիրություն, ելնելով ծանր վթարի դեպքում ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկի հերմետիկ գոտում շոգեգազային միջավայրի պարամետրերի վերլուծությունից:

Ատենախոսության թեմայով հրատարակված աշխատանքների ցանկ.

1. **Պետրոսյան Վ.Գ., Եղոյան Է.Ա., Գրիգորյան Ա.Դ.** Ջրածնային վտանգը ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկներում ծանր վթարի դեպքում//ՀԱՊՀ Լրաբեր. Տարեկան գիտաժողովի նյութերի ժողովածու.-Երևան, 2016.-Մաս 2.-էջ 547-554:
2. **Պետրոսյան Վ.Գ., Գրիգորյան Ա.Դ.** ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկներում ծանր վթարի ներիրանային փուլում ջրածնի այրման ռեժիմների վերլուծությունը //ՀՀ ԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղեկագիր. Տեխն. գիտ. սերիա.-Երևան, 2017.-Հատ. 70, № 3.-էջ 323-332:
3. **Գրիգորյան Ա.Դ.** Ջրածնի պասսիվ ավտոկատալիտիկ ռեկոմբինատորների աշխատանքային առանձնահատկությունների ուսումնասիրումը ծանր վթարի դեպքում//ՀԱՊՀ Լրաբեր./ Տարեկան գիտաժողովի նյութերի ժողովածու.-Երևան, 2017.-Մաս 3.-էջ 765-773:
4. **Գրիգորյան Ա.Դ.** Ծանր վթարի արտաիրանային փուլում պայթունավտանգ գազային խառնուրդի ձևավորման վտանգի գնահատումը ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկներում //ՀՃԱ Լրաբեր.-Երևան, 2017.- Հատ.14, №1.-էջ 76-79:
5. Характеристики систем мониторинга водорода для управления тяжелыми авариями на атомной электростанции/**В.Г. Петросян, Э.А. Егоян, А.Д. Григорян и др.** //Теплоэнергетика.- 2018.- № 2.- С. 3-12.
6. **Պետրոսյան Վ.Գ., Գրիգորյան Ա.Դ., Եղոյան Է.Ա.** Ջրածնի պասսիվ ավտոկատալիտիկ ռեկոմբինատորների ներդրման խնդիրները

ատոմային էլեկտրակայաններում //ՀՀ ԳԱԱ և ՀԱՊՀ Տեղեկագիր. Տեխն. գիտ. սերիա.-Երևան, 2018.-Հատ. 71, №1.-էջ 51-61:
7. Ծանր վթարի դեպքում ՋՋԷՌ-440 ռեակտորով էներգաբլոկներում ջրածնային վտանգի մեղմման այլընտրանքային մեթոդի մշակումը/ **Վ.Գ. Պետրոսյան, Ա.Դ. Գրիգորյան, Է.Ա Եղոյան և ուր.**// ՀԱՊՀ Լրաբեր./ Տարեկան գիտաժողովի նյութերի ժողովածու.-Երևան, 2018.-Մաս 3.-էջ 754-766:
8. **Petrosyan V.G., Yeghoyan E.A., Grigoryan A.D.** An Alternative Method to Mitigate the Hydrogen Challenge in Severe Accidents at a Nuclear Power Plant// Proceedings of NPUA: Electrical Engineering, Energetics.-2018.- №2.- P. 105-114.
9. **Петросян В. Г., Егоян Э. А., Григорян А. Д., Мартиросян М.В.** Угроза образования горючей смеси в малых помещениях гермообъема энергоблока АЭС при тяжелой аварии //Теплоэнергетика.- 2019.- № 6.- С.59–67.

Григорян Арман Давидович

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОДОРОДНОЙ УГРОЗЫ ПРИ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЯХ НА ЭНЕРГОБЛОКАХ С РЕАКТОРОМ ВВЭР-440 И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ СМЯГЧЕНИЯ

РЕЗЮМЕ

В случае тяжелых аварий актуальность проблемы надежного и эффективного обеспечения водородной взрывобезопасности впервые стала очевидной после запроектной аварии Три Майл Айленда и обострилась после тяжелой аварии на атомной электростанции (АЭС) Фукусима-Дайичи в 2011 году. Последняя ввиду отсутствия систем аварийного удаления и контроля концентрации водорода сопровождалась разрушениями реакторных зданий из-за мощных водородных взрывов и последующими радиоактивными неконтролируемыми выбросами в окружающую среду. Несмотря на остроту проблемы, вопросы обеспечение водородной безопасности на многих АЭС, эксплуатируемых в настоящее время в мире, практически продолжают оставаться частично нерешёнными. В частности, на втором энергоблоке Армянской АЭС (ААЭС), срок эксплуатации которого предусматривается продлить на 10 лет, до сих пор не существует окончательной концепции смягчения водородной угрозы в случае тяжелых аварий с точки зрения как необходимой аварийной эксплуатационной документации, так и наличия всесторонне обоснованных технических средств. Не существует единого подхода к выбору методов смягчения водородной угрозы в случае тяжелых аварий, что в некоторых случаях обусловлено специфичностью проектов разных АЭС, а также отсутствием необходимых всесторонних исследований.

Исходя из вышеуказанных обстоятельств, комплексное исследование водородной угрозы при тяжелых авариях на энергоблоках с реактором ВВЭР-440 и разработка новых методов смягчения водородной угрозы становятся весьма актуальной проблемой, с целью решения которой в диссертационной работе были поставлены следующие задачи:

- выявление наиболее характерных аварийных сценариев с точки зрения исследования водородной угрозы на энергоблоках с реакторами ВВЭР-440 при тяжелых авариях и оценка предельного количества водорода, угрожающего целостности герметичного помещения;
- оценка риска образования взрывоопасной газовой смеси на внекорпусной стадии тяжелой аварии на энергоблоках с реактором ВВЭР-440;

- исследование влияния процессов конденсации водяного пара на стенах герметичного ограждения на риск образования горючего состава водородо-паровоздушной смеси в случае тяжелой аварии;
- исследование требуемых характеристик системы мониторинга водорода в контексте проблем управления тяжелыми авариями на энергоблоках с реактором ВВЭР-440;
- комплексный анализ проблем внедрения пассивных автокаталитических рекомбинаторов водорода (ПАРВ) и разработка альтернативных методов смягчения водородной угрозы на энергоблоках с реактором ВВЭР-440.

Основные выводы

1. Разработана расчетная методика, посредством которой оценено предельное количество водорода, угрожающее физической целостности герметичного ограждения энергоблока с реактором ВВЭР-440 при тяжелой аварии.
2. Обосновано, что в случае энергоблоков с реактором ВВЭР-440 единственным рациональным методом предотвращения образования взрывоопасной газовой смеси и вызванной ею угрозы разрушения герметичного ограждения на внекорпусной стадии тяжелой аварии является обеспечение безопасной концентрации кислорода.
3. Разработана методика расчета, посредством которой детально изучено влияние теплоотводящей способности стен герметичной зоны энергоблока с реактором ВВЭР-440 на процессы конденсации водяного пара и образования горючего состава смеси водород-воздух-пар в условиях развития тяжелой аварии.
4. Обосновано, что при тяжелых авариях на энергоблоках с реактором ВВЭР-440 основным ограничивающим фактором внедрения ПАРВ с целью смягчения водородной угрозы является сложность обеспечения безопасных рабочих условий последних, а единственным возможным способом косвенного влияния на производительность ПАРВ может быть регулирование концентрации водяного пара.
5. Для одного из наиболее опасных, с точки зрения образования горючей смеси помещений герметичной зоны энергоблока с реактором ВВЭР-440, разработан альтернативный метод смягчения водородной угрозы, основанный на применении преднамеренного сброса среды и периодической подачи азота.
6. Разработан альтернативный метод смягчения водородной угрозы при тяжелых авариях, основанный на накоплении водорода и кислорода в отдельной части гермозоны посредством конденсации водяного пара из парогазовой смеси и их удаления из этой области.
7. Выполнено всестороннее исследование требуемых характеристик системы мониторинга водорода, исходя из анализа параметров парогазовой среды в герметичной зоне энергоблока с реактором ВВЭР-440 при тяжелой аварии.

Arman David Grigoryan

STUDY OF HYDROGEN CHALLENGE IN SEVERE ACCIDENTS AT POWER UNITS WITH A VVER-440 REACTOR AND DEVELOPMENT OF MITIGATION METHODS

SUMMARY

In the case of severe accidents, the relevance of the problem of ensuring of reliable and efficient hydrogen explosion safety became apparent for the first time after the Three Mile Island beyond design basis accident and aggravated after a severe accident at the Fukushima-Daichi nuclear power plant (NPP) in 2011. The

latter due to the absence of hydrogen emergency removal and concentration control systems, was accompanied by the destruction of reactor buildings due to powerful hydrogen explosions and subsequent radioactive uncontrolled releases to the environment. Despite the severity of the problem, hydrogen safety issues at many of NPPs' currently operating in the world practically continue to remain partially unsolved. In particular, at the second power unit of Armenian NPP (ANPP), the lifetime of which is provided to extend for 10 years, there is still no final concept to mitigate the hydrogen challenge in the case of severe accidents, both in terms of the required emergency operational documentation, and from the point of view of having a comprehensively justified technical means. There is no unified approach to the choice of methods to mitigate the hydrogen challenge in case of severe accidents, which in some cases is due to the specificity of design of different NPPs, as well as the lack of necessary comprehensive research.

Based on the above circumstances, a comprehensive study of the hydrogen challenge in severe accidents at power units with a VVER-440 reactor and the development of new methods to mitigate the hydrogen threat becomes a highly urgent problem, with the aim of solving which in the dissertation work the following tasks were set:

- identification of the most characteristic accident scenarios from the point of view of the study of the hydrogen challenge at power units with VVER-440 reactors in severe accidents and assessment of the limiting amount of hydrogen that can threaten the physical integrity of the containment;
- assessment of the risk of formation of an explosive gas mixture in the ex-vessel stage of a severe accident at power units with a VVER-440 reactor;
- study of the influence of water vapor condensation processes on the walls of the containment on the risk of formation of a combustible composition of the hydrogen-vapor-air mixture in the case of the severe accident;
- study of the required characteristics of the hydrogen monitoring system in the context of severe accident management problems at power units with a VVER-440 reactor;
- a comprehensive analysis of the problems of implementation of hydrogen passive autocatalytic recombiners (HPAR) and the development of alternative methods to mitigate the hydrogen challenge at power units with WWER-440 reactors.

Main conclusions

1. The calculation method is developed, by which the limiting amount of hydrogen that threatened the physical integrity of a containment of a power unit with a VVER-440 reactor in a severe accident was estimated.
2. It has been substantiated that in the case of power units with a VVER-440 reactor, the only rational method to prevent the formation of an explosive gas mixture and the threat of destruction of the containment at the ex-vessel stage of a severe accident is to ensure safe oxygen concentration.
3. A calculation method has been developed, by means of which the influence of the heat-removing capacity of the walls of the containment of a power unit with a VVER-440 reactor on the processes of water vapor condensation and the formation of a combustible composition of a hydrogen-air-steam mixture under conditions of a severe accident has been studied in detail.
4. It has been substantiated that in case of severe accidents at power units with a VVER-440 reactor, the main limiting factor for the HPAR implementation to mitigate the hydrogen challenge is the difficulty of ensuring safe working conditions of the latter, and the only possible way to indirectly affect the performance of HPAR can be through adjusting the concentration of water vapor.
5. For one of the most dangerous premises of the containment of a power unit with a VVER-440 reactor, from the point of view of formation of a combustible

mixture, an alternative method to mitigate the hydrogen challenge has been developed, based on deliberate venting and the periodical supply of nitrogen.

6. An alternative method of mitigating the hydrogen challenge in severe accidents has been developed, based on the accumulation of hydrogen and oxygen in the separated part of the hermetic zone by condensing water vapor from the vapor-gas mixture and removing them from that area.
7. A comprehensive study of the required characteristics of the hydrogen monitoring system was carried out by analyzing the parameters of the vapor-gas medium in the containment of a power unit with a VVER-440 reactor in a severe accident.