

# ТРИГА Төрлийн Судалгааны Реакторын Реактивитийн Анализ

Б.Туул<sup>1</sup>, Н.Норов<sup>2</sup>, Бат.Мөнхбат<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Цөмийн Энергийн Комиссын Ажлын алба,

<sup>2</sup>Монгол улсын их сургууль, Цөмийн физикийн судалгааны төв

Энэхүү ажлаар Тайланд улсын TRP-1/M1 судалгааны реакторыг 1.2 МВт, 1.5 МВт, 2.0 МВт тогтвортой чадалтай ажиллаж байх тохиолдлуудад реактивитийн өөрчлөлтийг судлав. Эдгээр тохиолдолд реактивитийг 0.5 \$, 1.0 \$ гэж сонгон авч реакторын чадал, түлшний дундаж температур, реактивитийн хамаарлыг EUREKA-2RR код ашиглан тооцоолов. Энэ реакторын чадал нь импульсын горимд 2000 МВт хүрдэг. Реакторын голомтоос шарагдаж байгаа дээжийг сугалахад үүсэх реактивитийн хамгийн их утга 1.0 \$ байхад реакторын чадал 18.1 МВт болж байна. Энэ нь импульсын горимд ажиллах хамгийн их чадалтай харьцуулахад маш бага байна. Мөн энэ үед түлшний максимум температур 394<sup>0</sup> С байгаа нь түүний хайлах температур (650<sup>0</sup> С)-аас бага байна. Иймд реакторын ажиллагаанд ямар нэгэн доголдол үүсэхгүй юм.

This study investigated relation between reactor power, average fuel temperature and reactivity using EUREKA-2RR code for steady state of the TRR-1/M1 research reactor when initial power values are 1.2 MW, 1.5 MW and 2.0 MW, reactivity values are \$ 0.5 and \$ 1.0 and SCRAM signal is considered. The maximum pulsing power of TRR-1/M1 reaches 2000 MW. When the maximum reactivity which allowed to insert to irradiation hole of TRR-1/M1 is \$ 1.0, the peak power is 18.1 MW. It is relatively low compared to the maximum pulsing power. Also, the maximum fuel temperature is 394<sup>0</sup> C, which is less than its melting temperature (650<sup>0</sup> C). In this case, any failure in the reactor safe operation will not arise.

Түлхүүр үг: реактивити, реакторын чадал, түлшний температур, EUREKA-2RR,

## I. ОРШИЛ

Дэлхийн 71 оронд 773 сургалт, судалгааны реактор ажиллуулж байснаас одоо 247 реактор ажиллаж байна. Манай улс сургалт, судалгааны реактортой болж цөмийн салбарын мэргэжилтэн бэлтгэх, эмнэлгийн оношлогоо, эмчилгээний изотоп үйлдвэрлэх, нейтрон идэвхжилийн шинжилгээ хийх зэрэгт ашиглах зорилт тавьж байна[1].



Зураг 1. Марокко улсын ТРИГА МАРК-II судалгааны реакторын усан сан

Судалгааны реакторын эрчим хүчний реактороос ялгагдах онцлог нь түүнд үүсэх дулааны энергийг биш харин нейтроны урсгалыг ашиглахад оршино. Судалгааны реакторын гол хэрэглээ нь сургалт, судалгаа болон цөмийн олон төрлийн туршилт судалгаанд шаардлагатай нейтроны үүсгүүр болгон ашиглах явдал юм. Судалгааны реакторын дулааны чадал нь тэгээс (критик эвлүүлэг) 200 МВт хүртэл байдаг.

Судалгааны реакторын ажиллагаа нь эрчим хүчний реактороос хялбар бөгөөд бага температурт ажилладаг. Түүнээс гадна судалгааны реактор овор хэмжээ бага учраас их дээд сургуулиудад лаборатори байдлаар ашиглах нь түгээмэл байдаг. Мөн маш бага хэмжээний түлш хэрэглэдэг учраас ашигласан түлшний хаягдал маш бага. Өмнө нь судалгааны реакторт түлш болгон өндөр баяжилттай уран ашигладаг байсан бол сүүлийн үед 20% хүртэл бага баяжилттай уран хэрэглэдэг болж байна.

Судалгааны реактор дээр гарах нейтроныг ашиглан материалын судалгаа, үл эвдэх сорил, нейтрон идэвхжилийн шинжилгээ хийх, эмнэлгийн болон аж үйлдвэрийн зорилгоор хэрэглэх цацраг идэвхт изотоп үйлдвэрлэх, трансмутацийн аргаар цэвэр хагас дамжуулагч үйлдвэрлэх, гоёлын чулууны өнгийг өөрчлөх зэрэг амьдралд өдөр тутам хэрэглэгдэх зүйлсийг үйлдвэрлэж байна. Түүнээс гадна цацрагийн хамгаалалт, аюулгүй байдал, реакторын үйл ажиллагааг удирдах зэрэгт оюутан суралцагчдыг дадлагажуулж цөмийн технологийг төрөл бүрийн салбарт ашиглах боломжийг бүрдүүлэх чухал ач холбогдолтой юм[2,3].

## II. СУДАЛГААНЫ ЗОРИЛГО

TRP-1/M1 судалгааны реакторын хувьд шууд унтрах систем нь хоёр тохиолдолд ажилладаг[4]. Үүнд:

1. Реакторыг хурдан зогсоох чадал (SCRAM)
- 2.2 МВт-аас хэтрэхэд удирдлагын савааг голомтод шууд оруулж, реакторыг унтраана.
2. Түлшний температур  $600^{\circ}\text{C}$ -ээс их болоход удирдлагын савааг оруулж, реактор шууд унтарна.

Энэхүү судалгааны ажилд TRR-1/M1 реакторын реактивитийн анализыг гүйцэтгэхийн тулд дараах зорилго тавьсан.

- Реактор 1.2, 1.5, 2.0 МВт чадалтай тогтвортой горимоор ажиллаж байх үед удирдлагын савааг сугалан гаргахад реакторын чадал, түлшний температур, реактивитийн өөрчлөлтийн анализ хийх. Энэ үед реакторыг шууд зогсоох чадлын утгыг 2.2 МВт гэж сонгон авч реактивитийн утгыг 0.5 \$ гэж авч үзэх.
- Реактор 1.2, 1.5, 2.0 МВт чадалтай тогтвортой горимоор ажиллаж байх үед шарлагын дээжийг сугалан гаргахад реакторын чадал, түлшний температур, реактивитийн өөрчлөлтийн анализ хийх. Энэ үед реакторыг шууд зогсоох чадлын утгыг 2.2 МВт гэж сонгон авч реактивитийн утгыг 1.0 \$ гэж авч үзэх.

### III. ОНОЛЫН ХЭСЭГ

Цөмийн реакторын кинетикт реактивити гэдэг нь цөмийн реактор критик төлвөөсөө хазайх хазайлтыг илэрхийлдэг үзүүлэлт юм. Реакторын хяналтын савааг ашиглан реактивитийг удирддаг. Реакторын голомтод явагдаж байгаа цөмийн хуваагдах урвалаас үүсч байгаа нейтрон олширох эффектив коэффициент ( $k_{эфф}$ ) нь үүсч байгаа нейтроны тоо, шингэсэн болон алдагдсан нейтроны тоогоор тодорхойлогддог.

$$k_{эфф} = \frac{\text{нейтрон үүсэх хурд}}{\text{нейтрон шингэх хурд} + \text{алдагдах хурд}}$$

Хэрвээ  $k_{эфф} = 1$  бол цөмийн гинжин урвал өөрийгөө дэмжих буюу дараагийн урвалд шаардлагатай нейтроныг хангалттай үйлдвэрлэж байна гэсэн үг. Өөрөөр хэлбэл реактор критик төлөвт оршин тогтмол чадалтай ажиллана.

Реактивити:

$$\rho = \frac{k_{эфф} - 1}{k_{эфф}}$$

гэж тодорхойлогдоно.

$k_{эфф} = 1$  үед реактивити 0 байна. Реактивитийн абсолют тоон утга нь критик төлвөөсөө хэр хол байгааг харуулах ба. сөрөг

утга нь реактор унтрах, эерэг утга нь суперкритик төлөвтөө хүрэх магадлалыг заана.

Реактивити “доллар”, “цент”, “хожимдсон нейтроны хувь” гэх мэт үнэмлэхүй ба харьцангуй нэгжээр хэмжигдэнэ. Үнэмлэхүй нэгжээр хэмжих үед заримдаа реактивитийн утгын дараа  $\Delta k/k$  үсэг холбож тавьдаг. Энэ нь ямар ч нэмэлт мэдээлэл авч явахгүй бөгөөд хэмжилтийн нэгж алдагдаагүй болохын өвөрмөц илрүүлэгч болно. Харин заасан реактивитийг үнэмлэхүй нэгжтэй болгоно. Заримдаа реактивити процентоор илэрхийлэгдэнэ. Жишээ нь  $\rho = 0.002$  нь  $\rho = k_{эф} - 1/k_{эф} = 0.002$  гэсэн үг. Мөн  $\rho = 0.002 \Delta k/k$  эсвэл  $\rho = 0.2\% \Delta k/k$  эсвэл  $\rho = 0.2\%$  хэлбэртэй бичиж болно. Хэрэв жишээ нь хожимдсон нейтроны эффектив хувийн утга  $\beta = 0.004$  бол харьцангуй нэгжид бичигдсэн  $0.002$  реактивити нь  $\rho = 0.002/0.004 = 0.5$   $\beta$  буюу  $\rho/\beta = 0.5$  болно. Заримдаа реактивити хожимдсон нейтроны эффектив хувийн процентоор илэрхийлэгдэнэ. Хэрэв реактивити  $\beta$ -аас олон дахин бага бол энэ нь тохиромжтой. Билний энэ тохиолдолд реактивити 50%  $\beta$ -тай тэнцүү. Хэмжилтийн нэгж “доллар” (\$) нь  $\beta$ -тай эквивалент, өөрөөр хэлбэл  $1\$ = 1\beta$ . Бага реактивитийг хэмжихэд “доллар”-ын зууны нэг  $1\text{¢} = 0.01\$ = 0.01\beta$  болох “цент” (¢)-г хэрэглэнэ[5].

Ийнхүү манай тохиолдолд:

$$\rho = 0.007 = 0.007 \Delta k/k = 0.7\% \Delta k/k = 0.7\% = 1.0 \$$$

$$\rho = 0.0035 = 0.0035 \Delta k/k = 0.35\% \Delta k/k = 0.35\% = 0.5 \$$$

Харин  $\beta = 0,007$  үед:

$$\rho = 0,007 = 0,007 \Delta k/k = 0,7\% \Delta k/k = 0,7\% = 1.0 \beta = 1.0 \$ = 100 \text{ ¢}$$

Цөмийн хуваагдлын гинжин урвалын дүнд агшин зуурын болон хожимдсон нейтронууд бий болдог. Реактивитигээс үүдэлтэй осол нь зөвхөн агшин зуурын нейтронуудын улмаас үүсдэг. Реакторын чадал экспоненциалаар өсч, хяналт алдагдана. Реактивитигээс үүдэлтэй осол нь миллисекундын үзэгдэл учраас нэгэнт энэ төрлийн осол болж, реакторын ажиллагаа доголдсон бол реакторыг тогтворжуулах ямар ч боломжгүй. Иймд реактивити нь реакторын тогтвортой, аюулгүй ажиллагааны чухал үзүүлэлтүүдийн нэг юм[6].

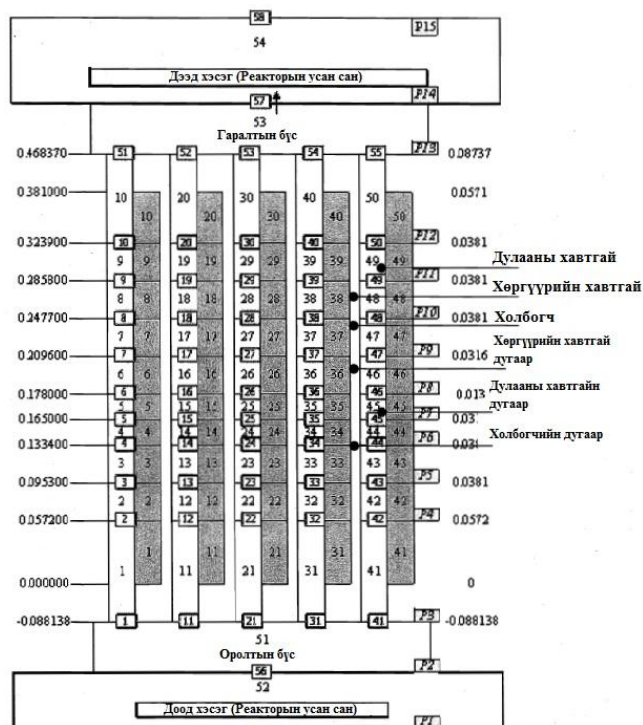
### IV. СУДАЛГААНЫ АРГА ЗҮЙ

Судалгааны реакторын аюулгүй байдлын үнэлгээний шаардлагыг тавихдаа реактор ажиллаж байх үед аливаа эрсдэл гарахад, өөрөө унтрах хангалттай чадавхитай байж, үргэлжлэн хэвийн горимдоо орж ажиллах реакторын загварыг баримтална. EUREKA-2RR нь

судалгааны реакторын голомтод эерэг, сөрөг реактивити үүсгэх үед реакторын аюулгүй байдалд дүн шинжилгээ хийх өндөр чадамжтай компьютерийн код юм. EUREKA-2RR-ын тооцоолол нь реакторын кинетик компьютерийн код хосолсон цөмийн дулааны болон гидравликийн анализад үндэслэдэг [8].

Тогтвортой төлвийн тооцоололд EUREKA-2RR нь реакторын голомтын системийн хамгийн их температурыг тооцоолох үүрэгтэй. EUREKA-2RR-ын үр дүнд агшин зуурын дулааны урсгал, үрлэн түлшний температур, түлшний бүрхүүлийн температур, хөргүүрийн температур зэрэг олон нөхцөлд температурын тархалтыг харуулна. Реакторын тогтворгүй чадлын горимын тооцоололд EUREKA-2RR нь хяналтын савааг оруулж гаргах, реактивити үүсгэх зэрэг тохиолдолд маш олон төрлийн параметруудийн өөрчлөлтийг харуулдаг.

EUREKA-2RR-ын тооцооллын загварыг 2-р зурагт харуулав. Тооцооллын загвар нь 5 сувагтай байх бөгөөд суваг бүр нь дулааны хавтгай, хөргүүрийн хавтгай, холбогч, дулааны хавтгайн дугаар, хөргүүрийн хавтгайн дугаар, холбогчийн дугаараас бүрдэнэ[4], [7].



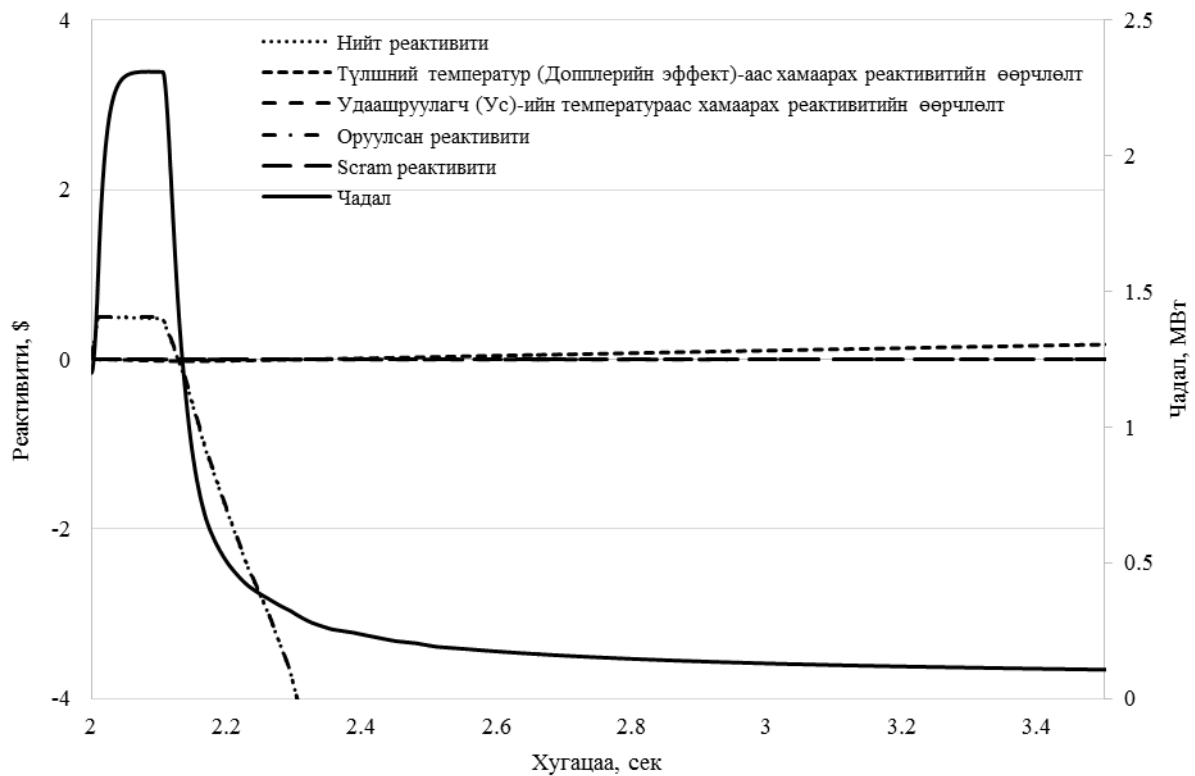
Зураг 2. EUREKA-2RR-ын тооцооллын загвар

### V. СУДАЛГААНЫ ҮР ДҮН

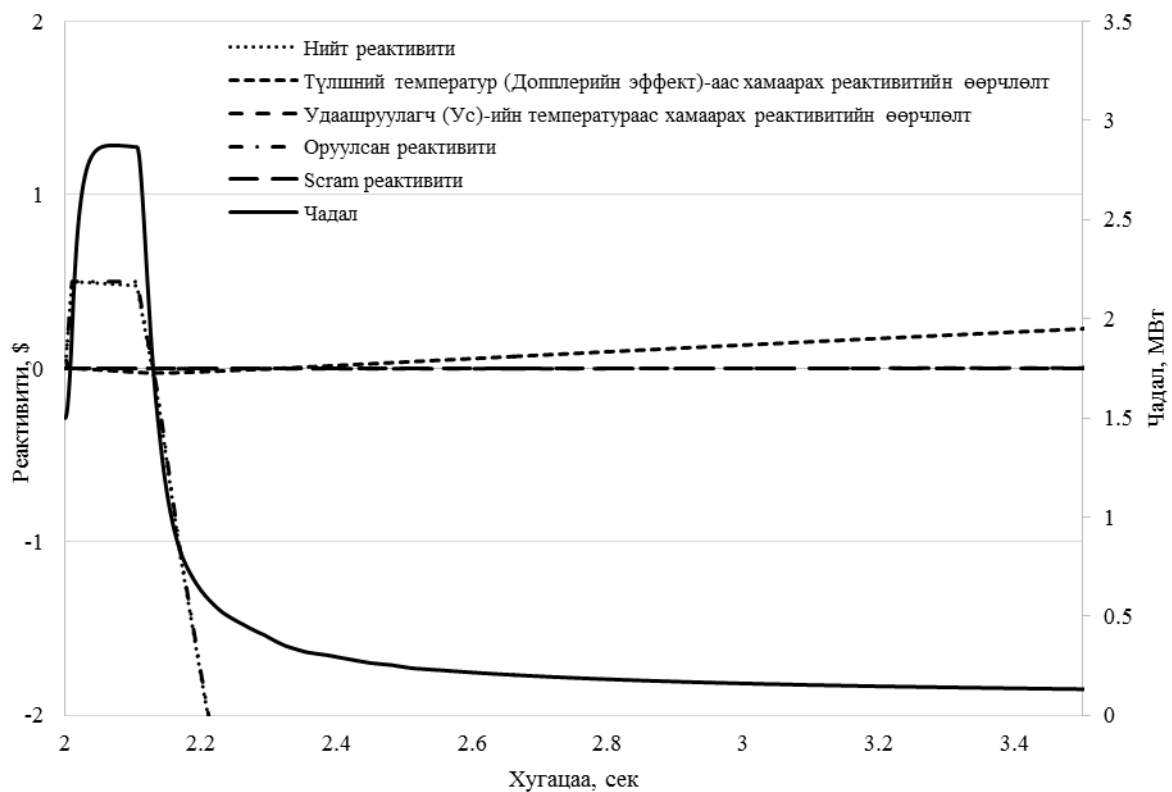
1. Реакторын голомтоос удирдлагын савааг реактивийн хэмжээ 0.5 \$-оор сугалах үеийн үр дүнг 1-р хүснэгтэд үзүүлэв. Зураг 3, 4, 5-г реакторын чадал болон реактивитийн өөрчлөлтийг хугацаанаас хамааруулан үзүүлэв.

Хүснэгт 1. Реактивити 0.5 \$ байх үеийн үр дүн

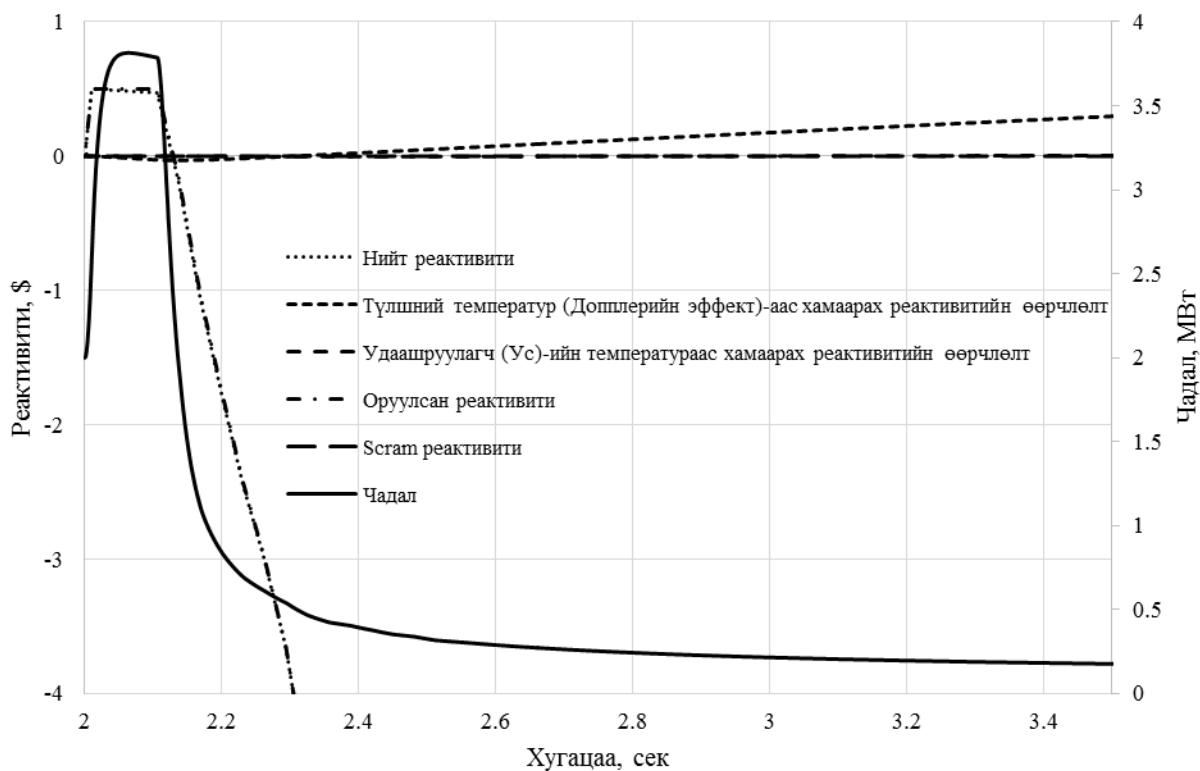
Үзүүлэлтүүд	Үр дүн		
Реактор тогтвортой горимд ажиллах чадал, МВт	1.2	1.5	2.0
Максимум чадал, МВт	2.31	2.87	3.81
Максимум чадалд хүрч байгаа хугацаа, сек	2.084	2.071	2.064
Түлшний максимум температур, °C	275	312	374
Түлшний бүрхүүл материалын температур, °C	135	138	150
Энерги ялгаралт, МВт-сек	3.09	3.86	5.14



Зураг 3. Реакторын чадал, реактивити, хугацааны хамаарал (Реактивити 0.5 \$, Тогтвортой төлөвт чадал 1.2 МВт)



Зураг 4. Реакторын чадал, реактивити, хугацааны хамаарал (Реактивити 0.5 \$, Тогтвортой төлөвт чадал 1.5 МВт)

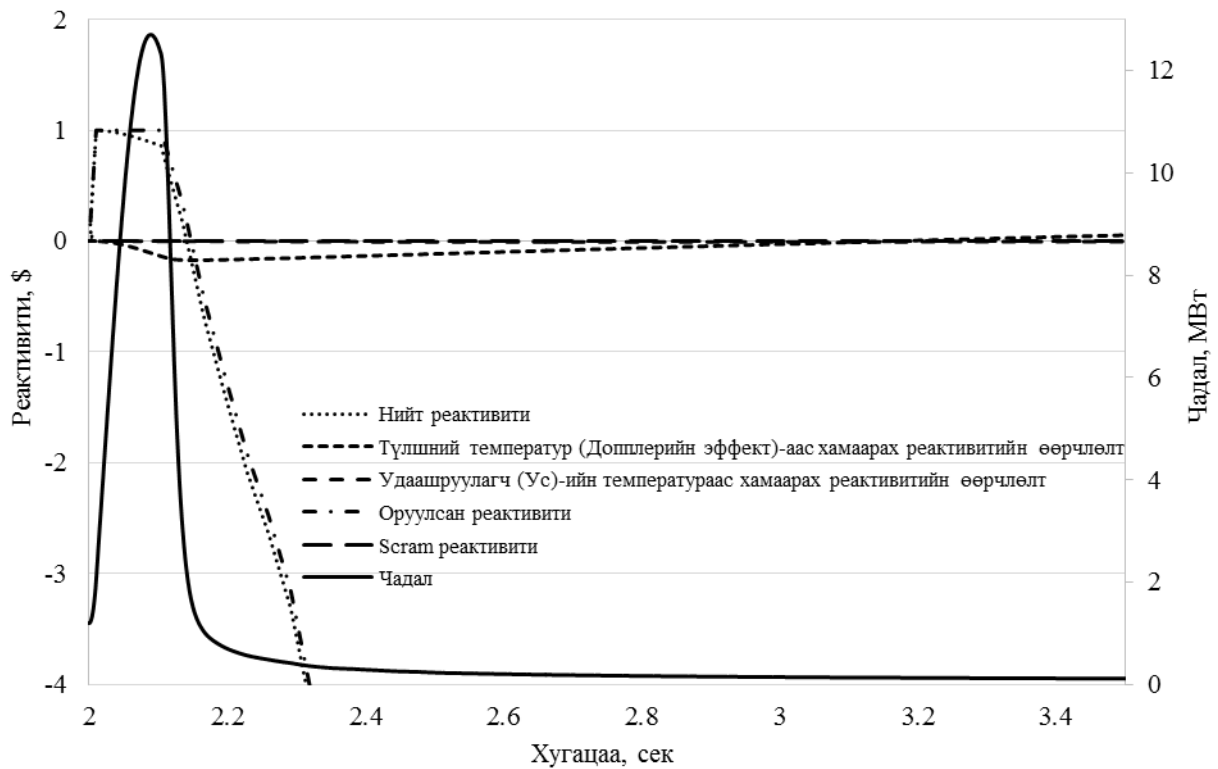


Зураг 5. Реакторын чадал, реактивити, хугацааны хамаарал (Реактивити 0.5 \$, Тогтвортой төлөвт чадал 2.0МВт)

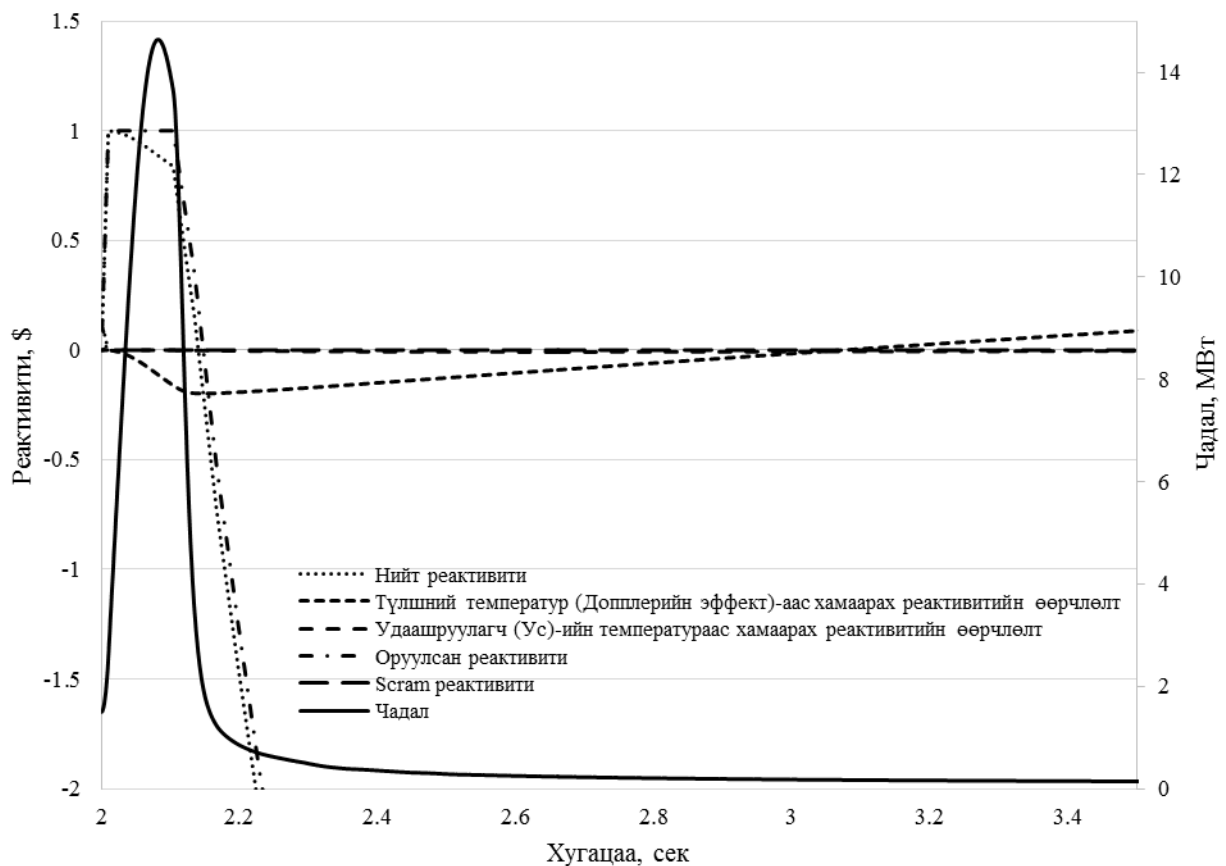
2. Реакторын голомтоос шарлагын дээжийг сугалан 1.0 \$ реактивити үүсгэх үеийн үр дүнг 2-р хүснэгтэд харуулав. Зураг 6, 7, 8-д реакторын чадал болон реактивитийн өөрчлөлтийг хугацаанаас хамааруулан үзүүлэв.

Хүснэгт 2. Реактивити 1.0\$ байх үеийн үр дүн

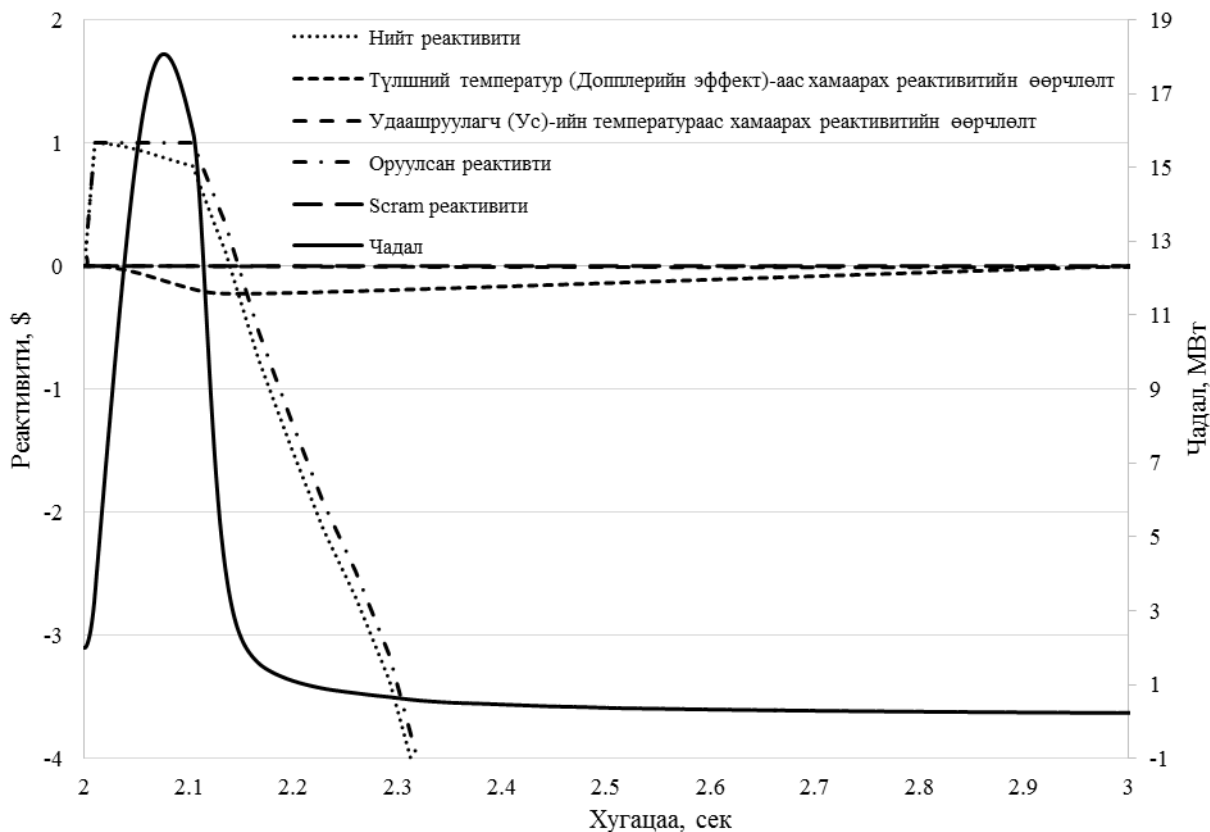
Үзүүлэлтүүд	Үр дүн		
	1.2	1.5	2.0
Реактор тогтвортой горимд ажиллах чадал, МВт	1.2	1.5	2.0
Максимум чадал, МВт	12.7	14.6	18.1
Максимум чадалд хүрч байгаа хугацаа, сек	2.089	2.082	2.076
Түлшний максимум температур, °C	289	328	394
Түлшний бүрхүүл материалын температур, °C	139	144	166
Энерги ялгаралт, МВт-сек	4.03	4.93	6.44



Зураг 6. Реакторын чадал, реактивити, хугацааны хамаарал (Реактивити 1.0 \$, Тогтвортой төлөвт чадал 1.2 МВт)

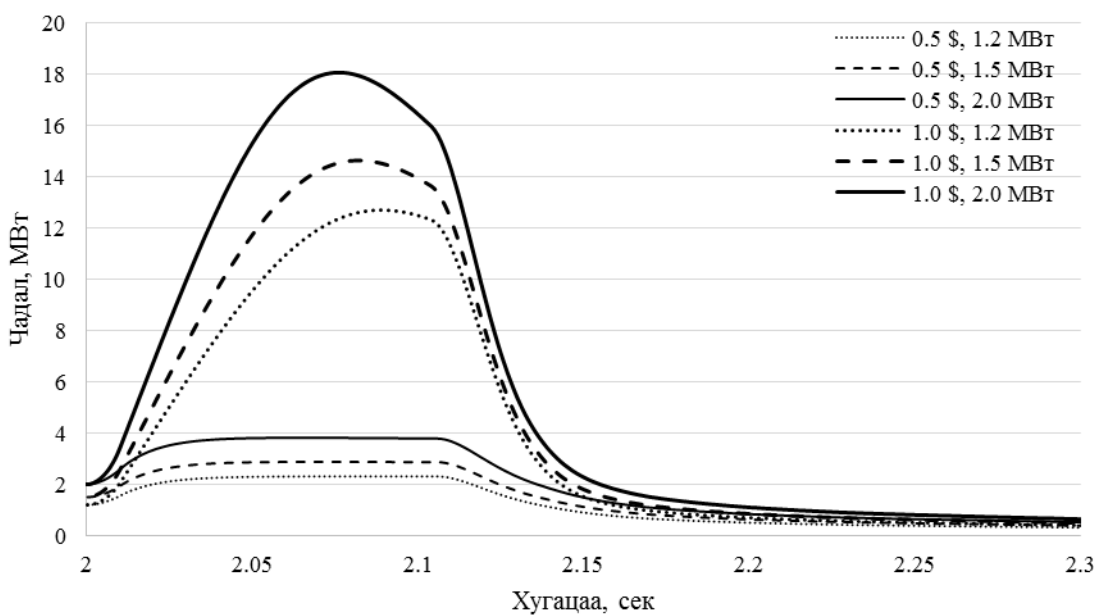


Зураг 7. Реакторын чадал, реактивити, хугацааны хамаарал (Реактивити 1.0 \$, Тогтвортой төлөвт чадал 1.5МВт)

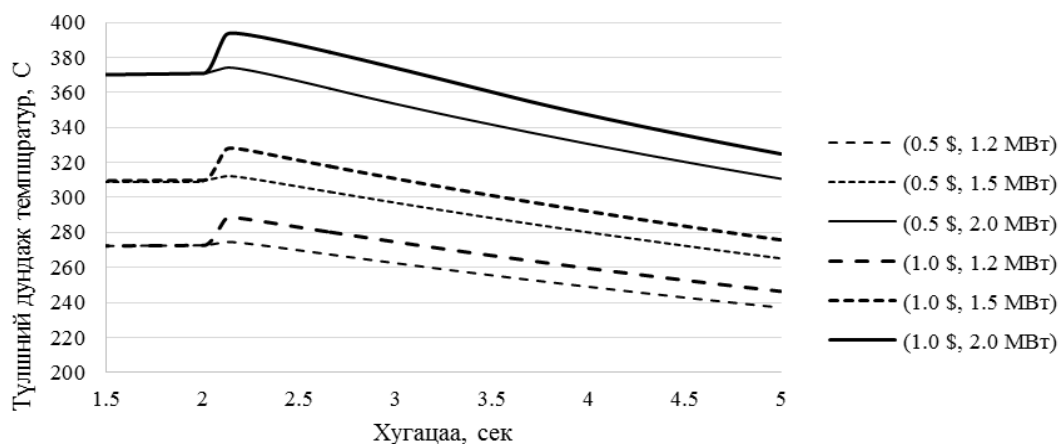


Зураг 8. Реакторын чадал, реактивити, хугацааны хамаарал (Реактивити 1.0 \$, Тогтвортой төлөвт чадал 2.0MWт)

3. Дээрх тохиолдлуудад реакторын чадал болон түлшний температурын өөрчлөлтийг Зураг 9, 10-г харуулав.



Зураг 9. Реакторын тогтвортой төлвийн чадал 1.2 MWт, 1.5 MWт, 2.0 MWт, реактивитийг 0.5 \$, 1.0 \$ утгаар өгөхөд чадлын өөрчлөлт өөрчлөлт



Зураг 10. Реакторын тогтвортой төлвийн чадал 1.2 МВт, 1.5 МВт, 2.0 МВт, реактивитийг 0.5 \$, 1.0 \$ утгаар өгөхөд түлшний температурын өөрчлөлт

## VI. ДҮГНЭЛТ

Реактор тогтвортой горимд ажиллаж байх үед 0.5 \$ реактивитийн хэмжээтэйгээр удирдлагын савааг голомтоос сугалж, реакторыг хурдан унтраах чадлыг 2.2 МВт гэж сонгон авч үзэв. Реакторын тогтвортой горимын чадал 1.2 МВт, 1.5 МВт, 2.0 МВт байхад харгалзан 2.031 сек, 2.014 сек, 2.006 секундэд реакторыг хурдан унтраах чадалд хүрч байгаа хэдий ч реакторын чадал цааш үргэлжлэн өсч 2.084 сек, 2.071 сек, 2.064 секундэд хамгийн их утгандаа хүрээд буурч байна. Энэ үед түлшний максимум температур харгалзан 275<sup>0</sup> С, 312<sup>0</sup> С, 374<sup>0</sup> С байна.

Реактор тогтвортой горимд ажиллаж байх үед реакторын голомтоос шарлагын дээжийг сугалах хамгийн их утга буюу 1.0 \$ реактивитийн хэмжээтэйгээр шарлагын дээжийг сугалан авав. Мөн реакторыг хурдан унтраах чадлыг 2.2 МВт гэж сонгов. Реактор тогтвортой горимд 1.2 МВт, 1.5 МВт, 2.0 МВт чадлаар ажиллаж байхад харгалзан 2.011 сек, 2.009 сек, 2.004 секундэд реакторыг хурдан унтраах чадалд хүрч байгаа хэдий ч реакторын чадал цааш үргэлжлэн өсч харгалзан 2.089 сек, 2.082 сек, 2.076 секундэд хамгийн их утгандаа хүрч байна. Энэ үед түлшний максимум температур харгалзан 289<sup>0</sup> С, 328<sup>0</sup> С, 394<sup>0</sup> С байна.

Энэ реакторын чадал нь импульсын горимд 2000 МВт хүрдэг. Реакторын голомтоос шарагдаж байгаа дээжийг сугалахад үүсэх реактивитийн хамгийн их утга 1.0 \$ байхад реакторын чадал 18.1 МВт болж байна. Энэ нь импульсын горимд ажиллах хамгийн их чадалтай харьцуулахад маш бага байна. Мөн энэ үед түлшний максимум температур 394<sup>0</sup> С байгаа нь түүний хайлах температур (650<sup>0</sup> С)-аас бага байна. Иймд реакторын ажиллагаанд ямар нэгэн доголдол үүсэхгүй юм.

- |   |  |
|---|--|
| <p>[1] Монгол Улсын төрөөс цацраг идэвхт ашигт малтмал болон цөмийн энергийн талаар баримтлах бодлого. 2009.</p> <p>[2] IAEA, Research Reactor Database.</p> <p>[3] С.Одмаа, Н.Норов, Г.Хүүхэнхүү, С.Даваа. Монгол улсад тохиромжтой судалгааны реактор сонгох асуудалд. МУИС-ийн Эрдэм шинжилгээний бичиг.Физик №355(16) 2011, 100-108-р тал.</p> <p>[4] D.SAENGCHANTR and N.ONISHI, Analytical Study with EUREKA-2/RR coupled Nuclear Thermal-Hydraulic Kinetic Code, Chulalongkorn University, Thailand, 2006.</p> | <p>[5] S.GLASSTONE and A.SESONNSKE, <i>Nuclear Reactor Engineering</i>, 3<sup>rd</sup> edition, 1981</p> <p>[6] T.SUGIYAMA, <i>Reactivity Initiated Accident</i>, ITC-2012 training course material, Japan, 2012</p> <p>[7] D.SAENGCHANTR and N.ONISHI, <i>Analysis of Steady-State and Transient Behavior on TRR-1/M1 with Computer Codes Coupled Neutronic Thermal-Hydrodynamic Model</i>, Office for Atom Peace, Thailand,</p> <p>[8] M.KAMINAGA, EUREKA-2/RR: A Computer Code for the Reactivity Accident Analyses in Research Reactors, the 50th Instructor Training Program – Course on Reactor Engineering III – (2012), Japan.</p> |
|---|--|