

# Монгол Улсад цөмийн ба устөрөгчийн эрчим хүчийг хослуулан ашиглах асуудалд

Н. Норов\*, Б. Хөхсүвд

Монгол улсын их сургууль, Цөмийн физикийн судалгааны төв

Өндөр температурын гелийн реактороос гарах 900°C температуртай гелийн хийг ашиглан усыг дулаан химийн аргаар задалж эсвэл хүрэн нүүрсийг уураар хийжүүлж хамгийн хямд үнэтэй устөрөгч үйлдвэрлэн устөрөгчийн эрчим хүчийг Монголд хөгжүүлэх нь дэлхий дахины эрчим хүчний шилжилт ба тогтвортой хөгжлийн бодлогод нийцэж байгаа юм. 2040 оноос манай улсад түүхий нүүрсний хэрэглээг халж, устөрөгчийн түлшний элементийн технологи бүхий хүрээлэн буй орчинд зөвхөн ус ялгарах экологийн үнэмлэхүй цэвэр устөрөгчийн эрчим хүч буюу устөрөгчийн эдийн засгийг хөгжүүлэх асуудлыг энэ өгүүлэлд дэвшүүлэн тавьж байгаа юм.

**Түлхүүр үг:** Өндөр температурын гелийн модуль реактор, түлшний элемент, хүхэр-иодын цикл

## I УСТӨРӨГЧИЙН ЭРЧИМ ХҮЧ

Цөмийн болон нарны энергийг ашиглан ус, нүүрс зэрэг устөрөгч агуулсан байгалийн түүхий эдээс устөрөгч үйлдвэрлэх, түүнийг хадгалах, тээвэрлэх, ахуй, тээвэр, төрөл бүрийн үйлдвэрлэлд хэрэглэхэд үндэслэсэн хүн төрөлхтний эрчим хүчний шилжилт болж байгаа устөрөгчийн эрчим хүч буюу устөрөгчийн эдийн засагт Монгол улс зайлшгүй шилжих шаардлага гарч байна. Энерги агуулагчийг гарган авах альтернатив аргуудын нэг бол устөрөгчийн эрчим хүч юм [1-6].



1-р зураг. Устөрөгчийн эрчим хүч ( $Ус + \text{цөмийн энерги} \rightarrow H_2$ ;  $H_2 + O_2 \rightarrow \text{цэвэр энерги} + Ус$ )

Устөрөгч альтернатив энерги зөөгч, түгээмэл түлш болох нь дараах учир шалтгаантай. Үүнд:

- Устөрөгч дулаан ялгаруулах чадамж ихтэй: 1кг устөрөгчийг шатаахад 120 МЖ дулааны энерги гарган авах бол харин 1 кг бензин шатаахад зөвхөн 47 МЖ, 1кг Багануурын нүүрс шатаахад 14 МЖ дулааны энерги ялгарна;

- Түлшний элементийн ашигт үйлийн коэффициент (АҮК) цахилгааны энерги үйлдвэрлэхэд 75% хүрнэ. Мөн дулаан ялгарахыг тооцвол түлшний элементтэй системийн нийт АҮК 90-95 % болно. Дулааны цахилгаан станцын АҮК -40%, цөмийн цахилгаан станцын АҮК- 33% байдаг [1,3];
- Устөрөгч орчлон ертөнц, дэлхий дээр хамгийн их тархсан элемент;
- Устөрөгчийн түлшний элемент нь экологийн цэвэр. Устөрөгч шатах үед зөвхөн ус ялгарах ба ямар нэг хортой хаягдал агаар мандалд хаягдахгүй.
- Устөрөгчийг дамжуулах хоолойгоор харьцангуй хялбар тээвэрлэх, мөн хадгалах, хуримтлуулах (хий буюу шингэн төлөвт) боломжтой. Устөрөгчийг дамжуулах хоолойгоор тээвэрлэх нь цахилгаан дамжуулахаас 3-5 дахин бага зардалтай [2].
- Түлшний элементийг өргөн ашиглах нь өндөр өртөгтэй цахилгаан дамжуулах шугамаас хамааралгүй болгоно.
- Устөрөгчийг зөвхөн энерги зөөгчөөр ашиглах биш металлурги, химийн болон нефтхимийн үйлдвэр зэрэг үйлдвэрийн бусад салбарт өргөн хэрэглэнэ.

Хөгжилтэй болон хөгжиж буй орнууд дэлхий дахиныг хамарсан дулаарлыг бий болгодог хүлэмжийн нүүрсхүчлийн хий ( $CO_2$ ) ялгаруулдаггүй, зөвхөн усны уур гаргах экологийн үнэмлэхүй цэвэр устөрөгчийн эрчим хүчийг хөгжүүлэх үндэсний хөтөлбөр

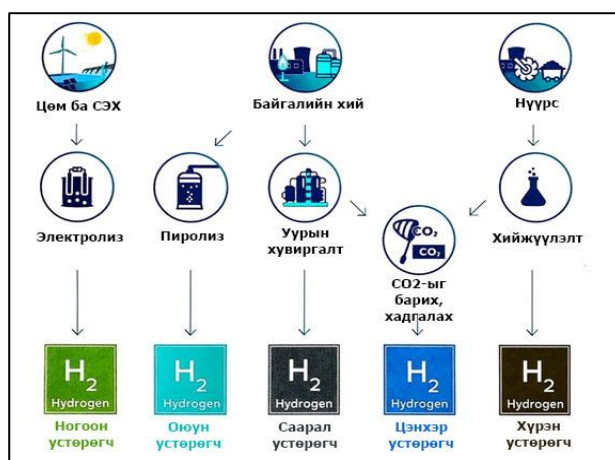
\* norov@seas.num.edu.mn

боловсруулан эрчимтэй хэрэгжүүлж байна. Хамгийн сүүлд 2021 онд ОХУ-д устөрөгчийн эрчим хүчний хөгжлийн үзэл баримтлалаа баталсныг жишээ болгон авч үзье [4]. Устөрөгчийн эрчим хүчний хөгжил дараах үе шаттай. I үе шат (2021-2024 он) устөрөгчийн кластер бий болно. 2024 онд дотоод зах зээлд устөрөгчийн энерги зөөгчийг ашиглахаас гадна устөрөгчийн экспорт 0,2 сая тонн хүрнэ. II үе шат (2025-2035 он) устөрөгч үйлдвэрлэх анхны худалдааны төслийг ашиглалтад оруулж 2035 онд устөрөгчийн экспорт 2—12 сая тонн хүрнэ. Энэ үе шатанд дотоод зах зээлд устөрөгч хэрэглэх лабораторид туршихад зориулсан төслүүдийг хэрэгжүүлж, эдийн засгийн төрөл бүрийн салбар (нефтхими, цахилгаан эрчим хүч, хими ба төмөрлөгийн үйлдвэрлэл, орон сууц нийтийн аж ахуй, тээвэр)-т устөрөгчийг өргөн хэрэглэнэ. III үе шат (2035-2050 он) устөрөгчийн эрчим хүчний дэлхийн зах зээлийн хөгжил өргөн хэмжээтэй болно. 2050 онд дэлхийн зах зээл дэх устөрөгчийн нийлүүлэлт 15-50 сая тонн болно. Сэргээгдэх эрчим хүчний үүсгүүр ашиглан үйлдвэрлэх үнэ малтмал түүхий эдээс устөрөгч үйлдвэрлэх үнэтэй ойролцоо болно. Ийнхүү устөрөгчийн эрчим хүчний дэлхийн хөгжлийн хандлага нь [8-10]:

- 2020 онд өрсөлдөх чадвартай устөрөгчийн автомашин,
- 2030 онд устөрөгчийг удаан хадгалах төхөөрөмж гарч, гэрийн түлшний элементээр цахилгаан үйлдвэрлэх болно.
- 2040 онд устөрөгчийн эрчим хүч зонхилох,
- 2050 онд устөрөгчийн түлштэй нисэх онгоц үйлчилдэг болно.

Манай улс ч гэсэн эрчим хүчний энэ альтернатив чиглэлийг аль болох ойрын үед хөгжүүлж эхэлбээс дэлхийн тэргүүлэх орнуудын технологийн хөгжилтэй угтаж нийлэх боломжтой.

Одоо “устөрөгчийн өнгө”-ний тухай ойлголтыг авч үзье. Нүүрсийг хийжүүлэх үед “хүрэн устөрөгч” ялгарна. Нүүрстөрөгчийн хийг барьж авахгүйгээр хийн хувиргалтаар “саарал устөрөгч” үйлдвэрлэх үед 1 кг устөрөгчид  $\text{CO}_2$  хаягдал янз бүрийн үнэлгээгээр 9-15 кг (9-15 кг  $\text{CO}_2$  /кг  $\text{H}_2$ ) байна.  $\text{CO}_2$  –ийг барьж авах хийн хувиргалтаар “цэнхэр устөрөгч” үйлдвэрлэх үед 1 кг  $\text{CO}_2$  / 1 кг  $\text{H}_2$  байна. Пиролизоор “оюун устөрөгч” үйлдвэрлэх үед урвалын бүтээгдэхүүн устөрөгч ба хатуу нүүрстөрөгч байна. Сэргээгдэх эрчим хүч ба цөмийн эрчим хүчээр ажиллах төхөөрөмж дээр электролизээр “ногоон устөрөгч” үйлдвэрлэх үед хаягдал ( $\text{CO}_2$ ) гарахгүй.



2-р зураг. Үйлдвэрлэх аргаас хамаарсан устөрөгчийн өнгө

2030, 2050 онд эрчим хүчний төрөл бүрийн эх үүсвэрийн хөрөнгө оруулалт, өөрийн өртгийг 1-р хүснэгтэд харьцуулж үзүүлэв.

1-р хүснэгт. Эрчим хүчний төрөл бүрийн эх үүсвэрийн хөрөнгө оруулалт, цахилгаан эрчим хүчний өртөг[1,5,6]

Үйлдвэрлэлийн технологи	Хувийн хөрөнгө оруулалт, долл/кВт			Үйлдвэрлэлийн өөрийн өртөг, цент/кВт·цаг		
	2010 он	2030 он	2050 он	2010 он	2030 он	2050 он
Түлшний элемент бүхий эрчим хүчний төхөөрөмж	3000-10000	500-1000	300-500	2-3 (4-5)	2-3 (4-5)	2-3 (4-5)
Нүүрсний дулааны цахилгаан станц	1500-2500	1000-1150			3,5-4(8-12)	3,5-4(8-12)
Цөмийн цахилгаан станц	1500-2500	1500-2500			4-5 (8-12)	4-5 (8-12)
Биомасс	1000-2500	950-1900	900-1800	3,1 - 11	3 - 9,6	2,9 - 9,4
Геотермаль цахилгаан станц	1700-5700	1500-5000	1400-4900	3 - 9,7	3 - 8,7	2,9 - 8,4
Бага оврын усан цахилгаан станц	2500	2200	2000	5,6	5,2	4,9
Нарны фотоцахилгаан	3750-3850	1400-1500	1000-1100	17,8-54,2	7-32,5	6-29
Нарны термоцахилгаан	2000-2300	1700-1900	1600-1800	10,5-23	8,7-19	6-17,5
Эх дэлхийн салхин станц	900-1100	800-900	750-900	4,2-2,2	3,6-2,1	3,5-2,1

## II МОНГОЛ УЛСАД УСТӨРӨГЧИЙН ЭРЧИМ ХҮЧИЙГ ХӨГЖҮҮЛЭХ АСУУДАЛ

Монгол улсад устөрөгчийн эрчим хүчийг хөгжүүлэхтэй холбоотой дараах хүчин зүйлсийг авч үзэх шаардлагатай. Үүнд:

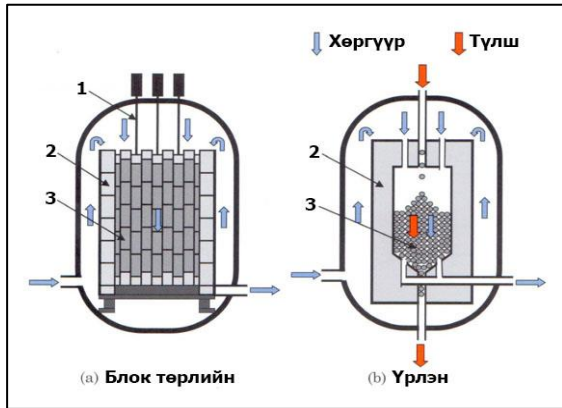
1. Монгол улсад электролизын аргаар устөрөгч үйлдвэрлэх 38 жилийн туршлагатай. 1984 онд 4-р дулааны цахилгаан станцыг ашиглаж эхэлснээс хойш устөрөгч үйлдвэрлэн станцын турбины хөргөлтөд түүнийг ашиглаж байна;
2. Монгол Улс хүрээлэн буй орчинд харьцангуй цэвэр байгалийн хийн нөөцгүй тул манай орны эрчим хүчний нөөц уран, хүрэн нүүрсээ ашиглах бодлогын үүднээс цөмийн ба устөрөгчийн эрчим хүчийг хослуулан ашиглах нь зүйтэй;
3. Монголын эрчим хүчний хангамжийн 90 гаруй хувь, экспортын ихэнх хувь нь нүүрс учраас манай улсад экологийн хор хөнөөлтэй, үрэлгэн нүүрсний эдийн засгаас нүүрстөрөгч ялгаруулдаггүй экологийн үнэмлэхүй цэвэр устөрөгчийн эдийн засагт бусад орнуудын адил шилжих шаардлагатай;
4. Манай улсад эрчим хүч, авто болон агаарын тээвэр, хими, хүнсний үйлдвэр, газын тос боловсруулахад устөрөгч шаардлагатай. Өндөр температурын гелийн модуль реактороос гарах 900°C температуртай

гелийн хийг ашиглан үйлдвэрлэх устөрөгч хамгийн хямд байна;

5. Түлшний элементийн катализатор болох паллади (Pd), цагаан алт (Pt) зэрэг үнэтэй элементүүдийн оронд нано технологиор гарган авсан материалыг ашиглах болсон учир түлшний элементийн үнэ жилээс жилд буурч байна. 2040 онд түлшний элемент бүхий эрчим хүчний төхөөрөмжийн хувийн хөрөнгө оруулалт 500 долл/кВт хүртэл буурах (1-р хүснэгт) тул аймгийн төв, сумын цахилгаан, дулааны хэрэгцээг хангахад устөрөгчийн төхөөрөмж ашиглах боломжтой болно;
6. Эдийн засаг, техникийн тэргүүлэгч орнууд устөрөгчийн эрчим хүч хөгжүүлэх үндэсний хөтөлбөрөө боловсруулан эрчим хүчний технологийн шилжилт болж байна. Манай улс ч гэсэн эрчим хүчний энэ альтернатив чиглэлийг аль болох цаг алдалгүй хөгжүүлж, дэлхийн тэргүүлэх орнуудын хөгжилтэй утгаж нийлэх боломжтой.

## III УСТӨРӨГЧ ҮЙЛДВЭРЛЭХ ЗОРИУЛАЛТТАЙ ӨНДӨР ТЕМПЕРАТУРЫН ГЕЛИЙН МОДУЛЬ РЕАКТОРЫН ТӨСЛҮҮД

Өндөр температурын гелийн модуль реакторын түлшний эвлүүлэг нь гелийн хийн суваг нэвт гарсан призм хэлбэртэй бал чулуун блоктой эсвэл үрлэн түлшний элемент бүхий давхаргатай хоёр төрөл байдгийг 3-р зурагт харуулав.



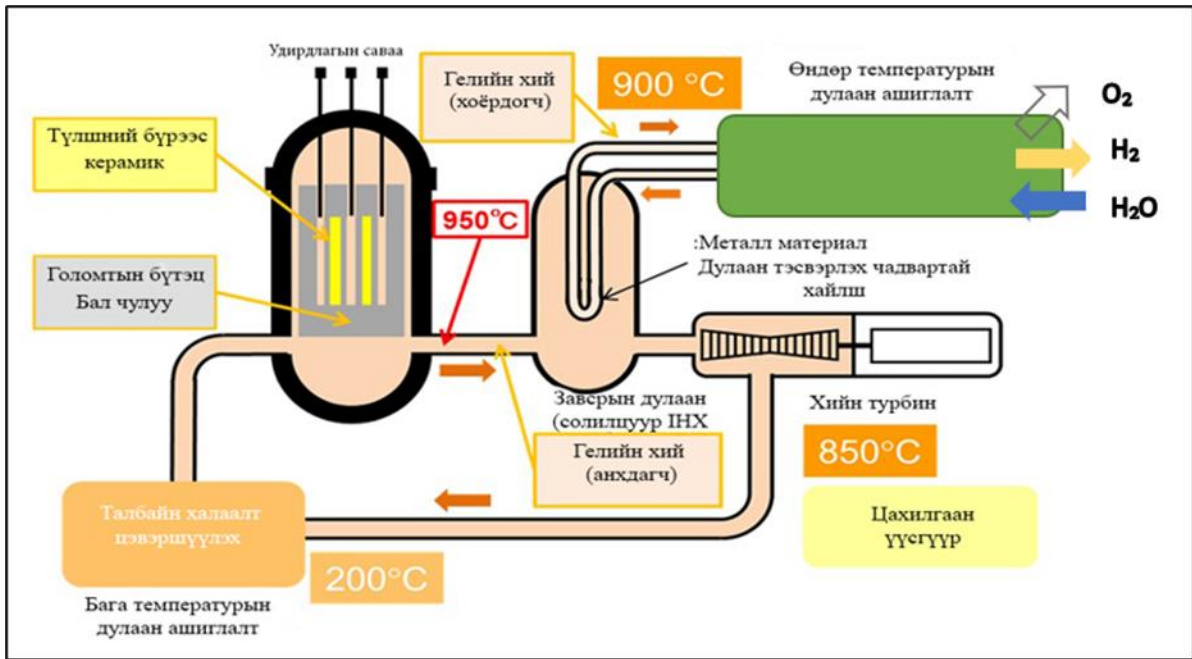
3-р зураг. Өндөр температурын гелийн модуль реакторы 2 төрлийн загвар

Призм реакторын төслүүд: ОХУ-ын GT-MHR (GasTurbine-Modular Helium Reactor), Японы GTHTTR-300, Үрлэн түлштэй реакторын төслүүд:

БНХАУ-ын HTR-PM (High Temperature Reactor-Pebble-bed-Module), АНУ-ын Xe-100, ӨАБНАУ-ын RBMR (Pebble-bed modular reactor), ӨФБНУ гэх мэт [7-12].

#### IV УСТӨРӨГЧИЙН ҮЙЛДВЭРЛЭЛ

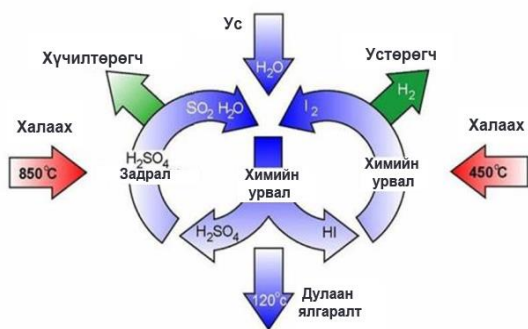
АНУ-ын эрчим хүчний яам “General Atomics” компани ба “Rosatom” улсын корпорацын санхүүжилтээр И.И.Африкантовын нэрэмжит машин байгууламжийн туршилт, зохион бүтээх товчоо (ОКБМ)-нд зохион бүтээгдсэн GT-MHR (GasTurbine-Modular Helium Reactor) реактораас гарах 900°C температуртай гелийн хийг завсрын дулаан солилцуураар устөрөгч үйлдвэрлэхэд ашиглах бүдүүвчийг 4-р зурагт харуулав [7,11,13].



4-р зураг. GT-MHR реакторын 900°C температуртай гелийн хийг завсрын дулаан солилцуураар устөрөгч үйлдвэрлэхэд ашиглах бүдүүвч

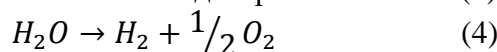
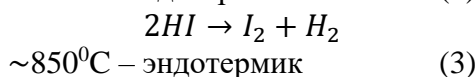
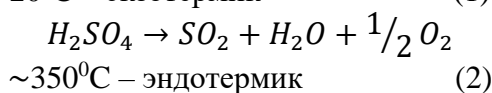
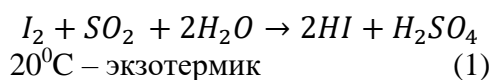
Устөрөгч үйлдвэрлэх дулаан химийн хүхэр-иод (S-I) циклийн үед усан дээр хүхрийн диоксид ба иод нэмж устөрөгчийн иодид ба хүхрийн хүчил үүсгэх экзотермик урвал явуулна. Зохих нөхцөлтэй үед эдгээр бодис холигдохгүй бөгөөд хялбар салгаж болно. Хүхрийн хүчил 850° температуртай үед задарч хүчилтөрөгч чөлөөлөгдөн буцаад хүхрийн диоксид үүснэ. Устөрөгчийн иодид 350° орчим температуртай үед задарч устөрөгч чөлөөлөгдөн буцаад иод үүснэ. Урвалын эцсийн үр дүнд ус устөрөгч ба хүчилтөрөгч болж задарна. Процессын оролт дээр зөвхөн ус ба өндөр температурын дулааны

энерги шаардлагатай. Харин гаралт дээр устөрөгч, хүчилтөрөгч, нам температурын дулааны энерги үүснэ. S-I циклийг 1970-аад оны дунд үеэс “General Atomic” судалж эхэлсэн бөгөөд Японы HTTR реактор дээр хийгдсэн инженерийн туршилтын нэг чиглэл болох хүхэр-иод (S-I)-ийн циклээр устөрөгч үйлдвэрлэх туршилтыг амжилттай хийжээ [11,15]. Энэ циклийн бүдүүвчийг 5-р зурагт харуулав.



5-р зураг. Устөрөгч үйлдвэрлэх S-I цикл

Термохимийн Усны задралын дулаан химийн хүхэр-иод цикл нь 3 химийн урвалаас бүрдэнэ:



Цахилгаан эрчим хүч ашиглан усыг электролизын аргаар задалж устөрөгч үйлдвэрлэхээс нүүрснээс устөрөгч үйлдвэрлэх нь 2-р хүснэгтээс хархад хямд байна. Иймээс хүрэн нүүрсний нөөц ихтэй манай улс GT-MHR реакторын 900<sup>0</sup>C температуртай гелийн хийгээр нүүрсний уурын хувиргалт хийж “хүрэн” устөрөгч үйлдвэрлэх нь чухал. Энэ процесс хоёр үе шаттай явагдана. Эхлээд нүүрсийг хийжүүлнэ (исэлдүүлнэ):



Дараа нь нүүрстөрөгчийн оксидыг нүүрстөрөгчийн диоксид хүртэл усаар исэлдүүлж  $CO + H_2O = CO_2 + H_2$  устөрөгч гарган авна.

Төрөл бүрийн эх үүсвэрээр устөрөгч үйлдвэрлэх өөрийн өртгийг 2-р хүснэгтэд харьцуулж харуулав[5,6].

2-р хүснэгт. Төрөл бүрийн эх үүсвэрээр үйлдвэрлэх устөрөгчийн өөрийн өртөг[5,6,7]

Эх үүсвэр	Устөрөгч үйлдвэрлэх өөрийн өртөг, ам.долл/кг	
	Одоо	Ирээдүй
Нүүрс хийжүүлэх	2 - 2,5	
Цөмийн цахилгаан станц	2,3	0,6 (GT-HMR)

Цахилгаан эрчим хүчний сүлжээний цахилгаан	6 - 7	4
Биомасс	5 - 7	1 - 3
Нарны цахилгаан станц	10 - 30	3 - 4

## V МОНГОЛ УЛСАД 2040 ОНД ШААРДАГДАХ УСТӨРӨГЧИЙН ХЭРЭГЦЭЭ, ХАНГАМЖ

Монгол улсын цахилгаан эрчим хүч, Улаанбаатар хотын дулаан хангамж, устөрөгчийн түлшний элементтэй автомашины хэрэгцээнд 2040 оны төвшинд шаардагдах устөрөгчийн хэмжээ, энэ хэрэгцээг хангах өндөр температурын гелийн модуль реактор (GT-MHR)-ын тоо, хөрөнгө оруулалтыг тооцож үзье. Монгол улсад 2040 оны түвшинд шаардагдах цахилгаан эрчим хүчний хэрэгцээ  $20 \cdot 10^9$  кВт·цаг гэж үзэж, 2/3-ыг сэргээгдэх эрчим хүч нар, салхи, ус болон GT-MHR реактортой цөмийн цахилгаан станцаас, 1/3 болох  $7 \cdot 10^9$  кВт·цаг орчмыг устөрөгчийн эрчим хүчээр хангана гэж үзвэл: Зарцуулагдах устөрөгчийн хэмжээ:  $7 \cdot 10^9$  кВт·цаг/33,5кВт·цаг/кг= $2,0 \cdot 10^8$  кг  $\approx$  200 мян.тонн болно.

Улаанбаатар хотын дулаан хангамжийн хэмжээ 2040 онд  $8,0 \cdot 10^6$  Гкал гэж үзээд устөрөгчийг шууд шатааж ( $O_2 + 2H_2 = 2H_2O + Q$ )

Улаанбаатарын дулааныг хангахад:

$8,0 \cdot 10^6$  Гкал х 4,8 =  $2,8 \cdot 10^7$  ГЖ/120,6 МЖ/кг  $H_2 \cdot 0,9 \approx$  35 мян.тонн

Автомашинд: 500 мянган автомашин  $\approx$  150 мян. тонн

Ийнхүү манай улсын цахилгаан, дулааны эрчим хүч, автомашины түлшинд шаардагдах нийт 385 мян.тонн  $H_2$  үйлдвэрлэхэд 4 ширхэг GT-MHR реактор шаардлагатай бөгөөд ийм реакторын цахилгааны чадал  $4 \times 207$  МВт, хувийн хөрөнгө оруулалт 1528 \$ /кВт(цах) гэвэл хөрөнгө оруулалтын хэмжээ  $4 \times 436 \cdot 10^6$  \$= $1,7 \cdot 10^9$  \$ болно. Устөрөгч үйлдвэрлэх үйлдвэрийн хөрөнгө оруулалтыг нэмж тооцвол ойролцоогоор  $2 \cdot 10^9$  \$ болно.

## VI ДҮГНЭЛТ

1. “Шинэ сэргэлтийн бодлого”-ын үйл ажиллагааны хөтөлбөрийн эрчим хүчний сэргэлтийн байгальд ээлтэй, шинжлэх ухаан, дэвшилтэт технологид суурилсан цөмийн эрчим хүч ба ногоон устөрөгчийн

төслүүдийг хэрэгжүүлэхэд өндөр температурын гелийн модуль GT-HMR реактороос *гаргах* 900°C температуртай гелийн хийг ашиглан усыг дулаан химийн аргаар задалж эсвэл хүрэн нүүрсийг уураар хийжүүлж хамгийн хямд устөрөгч үйлдвэрлэж, улмаар устөрөгчийн түлшний элементийн технологи бүхий хүрээлэн буй орчинд зөвхөн ус ялгарах экологийн үнэмлэхүй цэвэр устөрөгчийн эрчим хүч ба цөмийн эрчим хүчийг хослуулан ашиглах асуудлыг дэвшүүлэв.

2. Устөрөгчийн түлшний элемент бүхий автомашиныг устөрөгчөөр цэнэглэх станц, аймгийн төв, сумын цахилгаан, дулааны хангамжийн устөрөгчийн түлшний элемент бүхий төхөөрөмж, газрын тос боловсруулах, хими, хүнсний үйлдвэрийг хангах устөрөгчийн үйлдвэрлэл, тээвэрлэлт, хадгалалт, хэрэглээний дэд бүтцийг буй болгох шаардлагатай.
3. GT-HMR реактор бүхий станцад 1 кВт-цаг цахилгаан эрчим хүч үйлдвэрлэх өөрийн өртөг 1,3 цент байгаа нь эрчим хүчний үнийг тогтвортой барих баталгаа болохын зэрэгцээ ийм 4 реактортой станц нь манай улсын устөрөгчийн хэрэгцээг 2040 онд хангах бөгөөд түүний хөрөнгө оруулалт 2 тэрбум ам.доллар, 1 м3 устөрөгчийн өөрийн өртөг 5 центээс хэтрэхгүй болно.
4. Манай улсын эдийн засгийн хувьд алдагдалтай, экологийн хувьд хор хөнөөлтэй түүхий нүүрсний зах зээлийг импортын хараат бус, дэлхийн дулаарлын эх үүсвэр нүүрстөрөгч ялгаруулдаггүй экологийн үнэмлэхүй цэвэр устөрөгчийн түлшний элемент бүхий устөрөгчийн эдийн засагт 2040 оноос шилжих нь хот суурин газрын агаарын бохирдол утааны асуудлыг бүрэн шийдвэрлэж, нүүрстөрөгч ялгаруудаггүй цэвэр эрчим хүчний дэлхийн технологийн шилжилттэй нийцэх боломж бүрдэх юм.

## VII АШИГЛАСАН МАТЕРИАЛ

- [1] Н.Норов, С.Одмаа, Т.Жамъянсүрэн, Г.Энхбаатар, М.Энхбаатар. Устөрөгчийн эрчим хүчийг Монголд хөгжүүлэх асуудалд. МУИС-ийн эрдэм шинжилгээний бичиг, Физик №23 (455), 2016, 100-106-р тал.
- [2] Н.Норов, С.Одмаа, Б.Мөнхбат, Т.Жамъянсүрэн, Г.Нарантунгалаг, Б.Хөхсүвд. Цөм-устөрөгчийн эрчим хүчийг Монголд хөгжүүлэх үзэл баримтлалыг боловсруулах асуудалд. МУИС-ийн эрдэм шинжилгээний бичиг, Физик сэтгүүл №31(535), 2020, 148-153-р тал.
- [3] S.P.Filippov, A.V.Yaroslavtsev. Hydrogen energy: development prospects and materials Russ. Chem. Rev., 2021, 90 (6) 627 - 643.
- [4] Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации. Правительство Российской Федерации, Распоряжение от 5 августа 2021г. №2162. Москва.
- [5] Гительман Л.Д. и Ратников Б.Е. (Эффективная энергокомпания, Москва, ЗАО «Олимпия-Бизнес», 2002 г.)
- [6] Geoffrey Rothwell, Evelyne Bertel, Kent Williams Can Nuclear Power Complete in the Hydrogen Economy. “Nuclear Production of Hydrogen” Third Information Exchange Meeting. Oarai, Japan. 5-7 October 2005 pp 27-41
- [7] Габараев Б.А. Атомная энергетика XXI века: учебное пособие / Б.А. Габараев, Ю.Б. Смирнов, Ю.С. Черепнин. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013.
- [8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Climate Change and The Role of Nuclear Power. IAEA, Vienna, 2020.
- [9] Ohta T. Some thoughts about the hydrogen civilization and the culture development // Intern. J. Hydrogen Energy. 2006. Vol. 31, pp161-166.
- [10] Goltsov V.A., Veziroğlu T.N., Goltsova L.F. Hydrogen civilization concept: historical and allplanetary aspects // Intern. J. Nucl. Hydrogen Prod. & Appl. 2006. Vol. 1. No. 4. pp112-133.
- [11] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Обзор ядерных технологий — 2020, IAEA, Vienna (2020)
- [12] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Advances in small modular reactor technology developments. 2016 Edition. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) <http://aris.iaea.org>.
- [13] S. Fujikawa et al., Achievement of reactor-outlet coolant temperature of 950°C in HTTR, Journal of Nuclear Science and Technology, 2004, Vol. 41, No. 12, pp1245–1254
- [14] S. Katanishi et al., Safety evaluation on the depressurization accident in the gas turbine high temperature reactor (GTHTR300),

- Nuclear Engineering and Design 237 (2007) 1372–1380.
- [15] N. SAKABA et al., Development Scenario of the Iodine-Sulphur Hydrogen Production Process to be Coupled with VHTR System as a Conventional Chemical Plant, Journal of Nuclear Science and Technology, 2008, Vol. 45, No. 9, pp 962–969.