

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРҒЫ БІЛІМ  
МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Ө.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты

«Материалтану, нанотехнология және инженерлік физика» кафедрасы

Акмолдаева Салтанат Жолдасбекқызы

«Қазіргі қолданыстағы ядролық реакторларды зерттеу»

**ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС**

6В07109 – «Инженерлік физика және материалтану»  
білім беру бағдарламасы

Алматы 2023

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРҒЫ БІЛІМ  
МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Ө.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты

«Материалтану, нанотехнология және инженерлік физика» кафедрасы

**ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ**

«Материалтану, нанотехнология  
және инженерлік физика»

кафедра меңгерушісі,

PhD докторы

К.К. Қудайбергенов

«29» шашыр 2023ж.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ  
НАО «КазНТУ им.К.И.Сатпаева»  
Горно-металлургический институт  
им. О.А. Байқоңырова

**Дипломдық жұмыс**

Тақырыбы: «Қазіргі қолданыстағы ядролық реакторларды зерттеу»

6B07109 – «Инженерлік физика және материалтану» білім беру  
бағдарламасы

Орындаған:

Ақмолдаева С.Ж.

Пікір беруші  
PhD, ассоц. профессор, доцент

Ғылыми жетекші  
PhD, ассоц. профессор



Мұхаметқаримов Е.С.

«25» шашыр 2023ж.

Дуаметұлы Б.

«29» шашыр 2023ж.

Алматы 2023

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРҒЫ БІЛІМ  
МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Ө.А. Байқоңыров атындағы Тау-кен металлургия институты

«Материалтану, нанотехнология және инженерлік физика» кафедрасы

**БЕКІТЕМІН**

«Материалтану, нанотехнология  
және инженерлік физика»  
кафедра меңгерушісі,

PhD докторы

Кудайбергенов К.К.



«29» маусым 2023ж.

**Дипломдық жұмыс орындауға**

**ТАПСЫРМА**

Білім алушы: Акмолдаева Салтанат Жолдасбекқызы

Тақырыбы: «Қазіргі қолданыстағы ядролық реакторларды зерттеу»

Университет ректорының "23" қараша 2022 жылғы №408-П/Ө  
бұйрығымен бекітілген

Аяқталған жұмысты тапсыру мерзімі "31" маусым 2023 ж.

Дипломдық жұмыстың бастапқы берілістері:

1. Ядролық реактор типтері бойынша қолданысы .

Дипломдық жұмыста қарастырылған мәселелер:

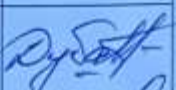
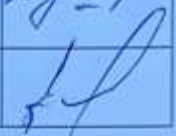
1. Қазіргі қолданыста қай реактор түрлері қолданылады;
2. Қазақстанға қай реактор түрі қолайлы.

Ұсынылған негізгі әдебиет 26 атаудан тұрады.

Дипломдық жұмысты дайындау  
КЕСТЕСІ

Бөлім атаулары, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге, кеңесшілерге көрсету мерзімдері	Ескерту
Әдеби шолу	26.01.2023-27.02.2023	
Тәжірибелік бөлім	12.03.2023-09.04.2023	
Дипломдық жұмысты алдын-ала қорғау	26.05.2023	

Дипломдық жұмыс (жоба) бөлімдерінің кеңесшілері мен норма бақылаушының аяқталған жұмысқа (жобаға) қойған қолтаңбалары

Бөлімдер атауы	Ғылыми жетекші, кеңесшілер (аты-жөні, тегі, ғылыми дәрежесі, атағы)	Қолтаңба қойылған мерзімі	Қолы
Әдеби шолу	Дуаметұлы Б., PhD, ассоц. профессор	24.05.2023	
Норма бақылау	Бейсебаева А.С., ф-м.ғ.к, аға оқытушы	24.05.2023	

Ғылыми жетекшісі

 Дуаметұлы Б.

Тапсырманы орындаған білім алушы

 Акмолдаева С.Ж.

Күні « 31 » \_\_\_\_\_ мамыр 2023 ж

## АҢДАТПА

Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университетінің күндізгі бөлімінің студенті Акмолдаева Салтанаттың «Қазіргі қолданыстағы ядролық реакторларды зерттеу» тақырыбындағы дипломдық жұмысына арналып жазылған аңдатпа.

Дипломдық жұмыста осы кездегі қолданыстағы ядролық реакторлардың қолданысы бойынша толық мәліметтер және тұжырымдама қарастырылған. Көпшілігі, әсіресе Қазақстан тұрғындары ядролық реакторға теріс пікірде. Бірақ та, реакторлардың әр түрлі типтеріне қарай ең қолайлы түрін осы дипломдық жұмыста ұсындым.

Дипломдық жұмыста реакторлармен танысу, өндірісі, адамға әсері, пайдаланылуы, қызмет ету мерзімі және реактордың түрлері туралы яғни, классификациясы толық қарастырылған. Қорытынды бөлімінде ядролық реакторлардың қай түрі Қазақстанда қолдануға ең тиімді екені тұжырымдалды.

## АННОТАЦИЯ

Аннотация к дипломной работе на тему «Исследование существующих ядерных реакторов» студентки дневного отделения Казахского национального исследовательского технического университета имени К.И.Сатпаева Акмолдаевой Салтанат.

В дипломной работе рассматриваются подробные сведения и концепция использования существующих на данный момент ядерных реакторов. Большинство, особенно жители Казахстана, негативно относятся к ядерному реактору. Но в этой дипломной работе я предложил наиболее подходящий тип реакторов для разных типов.

В дипломной работе подробно рассмотрены ознакомление с реакторами, производство, влияние на человека, использование, срок службы и виды реакторов, то есть классификация. В заключительной части было сформулировано, какой тип ядерных реакторов наиболее эффективен для использования в Казахстане.

## ANNOTATION

Abstract to the thesis on the topic «Study of existing nuclear reactors» by the full-time student of the Kazakh National Research Technical University named after K.I.Satbayev Akmoldaeva Saltanat.

The thesis discusses detailed information and the concept of using currently existing nuclear reactors. The majority, especially residents of Kazakhstan, have a negative attitude to the nuclear reactor. But in this thesis I proposed the most suitable type of reactors for different types.

In the thesis, familiarization with reactors, production, human impact, use, service life and types of reactors, that is, classification, are considered in detail. In the final part, it was formulated which type of nuclear reactors is most effective for use in Kazakhstan.

## МАЗМҰНЫ

	Кіріспе	9
1	Әдеби шолу	10
1.1	Ядролық реакторлар	10
1.2	Мемлекеттер бойынша ядролық реакторлар туралы мәліметтер	15
1.3	Бүгінгі әлемдегі ядролық энергетика 2021-2023 жылдардағы жаңартылған ақпарат бойынша	20
1.4	Ядролық реактор түрлері	24
2	Негізгі бөлім	42
2.1	Қазақстан үшін ядролық реакторды салудың тиімді әрі тиімсіз жақтары	42
2.2	Ұсынылған тұжырымдамалар	43
	Қорытынды	46
	Қысқартылған сөздер	47
	Пайдаланылған әдебиеттер	48



## КІРІСПЕ

Ядролық реактор дегеніміз басқарылатын ауыр ядролардың бөлінуінің тізбекті реакцияларын ұйымдастыру мен реттеуді атқаратын құрылғы болып табылады. Реактор жұмысы нәтижесінде ядролық энергия босап, сыртқы тұтынушылар пайдаланатын жылу энергиясына айналады. Ядролық реактор атом электр станциясының (АЭС)- ең негізгі бөлігі болып табылады. Атом электр станциясы ең әуелі жылу энергиясын механикалық энергияға, содан соң механикалық энергияны электр энергиясына айналдыратын кешен. Алғашқы коммерциялық атом электр станциялары 1950 жылдары жұмыс істей бастады.

Зерттеу реакторларының негізгі мақсаты - зерттеу және басқа мақсаттар үшін нейтрондардың көзін қамтамасыз ету. Олардың шығымы (нейтрондық сәулелер) қолдануға байланысты әр түрлі сипаттамаларға ие болуы мүмкін. Олар негізінен таза энергия тұтынушылары. Олардың қуаты мегаватт (немесе киловатт) жылу (Мвт немесе МВт) арқылы белгіленеді, бірақ біз мұнда тек Вт (немесе кВт) қолданамыз. Шын мәнінде, әлемдегі 250 зерттеу реакторының жалпы қуаты 3000 МВт-тан сәл асады.

2021 жылдың маусымындағы жағдай бойынша халықаралық Атом энергиясы агенттігінің зерттеу реакторларының дерекқоры 223 белсенді зерттеу реакторының, 11-і салынып жатқанын, 16-сы жоспарланғанын, 27-сі уақытша немесе ұзақ мерзімге тоқтатылғанын, 58-і біржола тоқтатылғанын және 511-і пайдаланудан шығарылғанын немесе пайдаланудан шығару процесінде екенін көрсетті. Белсенді және уақытша тоқтатылған зерттеу реакторларының көпшілігінің уақыты 40 жылдан асады.

2023 жылдың ақпанында жаңартылған ақпарат бойынша атом энергиясы қазір 440-қа жуық энергетикалық реактордан әлемдегі электр энергиясының 10%-ға жуығын қамтамасыз етеді. Зерттеулерден басқа бұл реакторлар медициналық және өнеркәсіптік изотоптарды алу үшін де қолданылады.

Осы дипломдық жұмысымның мақсаты әлемдегі өте жақсы энергия көзі болып саналатын АЭС-тің жалпы жағдайымен таныса отырып, АЭС-тің ең негізгі бөлігі болып саналатын ядролық реакторларды тиіптері бойынша қазіргі қолданысын зерттеу және қазіргі таңда Қазақстанға ең қолайлы ядролық реакторды анықтау бойынша өз тұжырымдамамды қарастыру.

## ӘДЕБИ ШОЛУ

### 1.1 Ядролық реакторлар

Ядролық реактор – ядролық тізбекті бөлу реакциясын немесе ядролық синтез реакцияларын бастау және басқару үшін қолданылатын құрылғы. Ядролық реакторлар атом электр станцияларында электр энергиясын өндіру үшін және ядролық теңіз қозғалысы үшін қолданады. Ядроның бөлінуінен болатын жылу жұмыс сұйықтығына (су немесе газға) беріледі, ол өз кезегінде бу турбиналары арқылы өтеді. Олар кеменің бұрандаларын басқарады немесе электр генераторларының біліктерін айналдырады. Ядролық генерацияланған буды негізінен орталықтандырылған жылу үшін пайдалануға болады. Кейбір реакторлар медициналық және өнеркәсіптік мақсаттағы изотоптарды алу үшін немесе қару – жарак плутонийін өндіру үшін қолданылады. 2022 жылғы жағдай бойынша Атом энергиясы жөніндегі халықаралық агенттік дүние жүзінде 422 ядролық энергетикалық реактор және 223 ядролық зерттеу реакторлары жұмыс істеп тұрғанын хабарлады [1].

#### *Жылу өндіруі*

Реактордың өзегі жылуды бірнеше жолмен шығарады:

- Бөліну өнімдерінің кинетикалық энергиясы осы ядролар жақын орналасқан атомдармен соқтығысқанда жылу энергиясына айналады.
- Реактор бөліну кезінде пайда болған гамма – сәулелердің бір бөлігін жұтып, олардың энергиясын жылуға айналдырады.
- Жылу нейтрондарды сіңіру арқылы белсендірілген бөліну өнімдері мен материалдардың радиоактивті ыдырауы нәтижесінде пайда болады. Бұл ыдырайтын жылу көзі реактор сөнгеннен кейін де біраз уақыт сақталады.

Ядролық процестер арқылы түрлендірілетін бір килограмм уран-235 (U-235) әдеттегідей жағылатын бір килограмм көмірден шамамен үш миллион есе көп энергия бөледі (уран-235 килограммына  $7,2 \times 10^{13}$  джоульге қарсы бір килограмм уран-235 үшін  $2,4 \times 10^7$  джоуль) [1].

#### *Қызмет ету мерзімі*

Атом электр станциялары әдетте 30, 40 жыл аралығындағы орташа қызмет етеді. Кейбіреулер атом электр станциялары дұрыс техникалық қызмет көрсету және басқару арқылы 80 жылға дейін немесе одан да ұзақ жұмыс істей алады деп санайды. Дегенмен, нейтрондардың сынуы мен тозуы салдарынан жарықтар пайда болған кезде кейбір өмірлік маңызды бөлшектерді, әсіресе реактор ыдысын және бетон конструкцияларын ауыстыру мүмкін емес, осылайша зауыттың қызмет ету мерзімін шектейді. Жоспарланған қызмет ету мерзімінің соңында зауыттар операциялық лицензиясы шамамен 20 жылға, ал АҚШ- та тіпті “кейіннен лицензияны жаңартуды” қосымша 20 жылға ұзарта алады.

Лицензия ұзартылса да, оның сақталуына кепілдік бермейді. Көптеген реакторлар лицензиясының немесе жобалық мерзімінің аяқталуына көп уақыт қалғанда жабылып, пайдаланудан шығарылады. Үнемдеу жұмысын жалғастыру үшін қажет ауыстыру немесе жақсарту шығындары соншалықты жоғары болуы мүмкін, сондықтан олар үнемді емес.

Реакторлардың көбеюі 30 немесе 40 жылдық жобалық қызмет ету мерзіміне жетуде немесе ол уақыттан да асуда. 2014 жылы Greenpeace (1971 жылы Канадада құрылған халықаралық үкіметтік емес экологиялық ұйым) ескірген атом электр станцияларының қызмет ету мерзімін ұзарту тәуекелдің жаңа дәуіріне аяқ басатынын ескертті [1].

### *Өндіріс және тау-кен өндіру*

2021 жылы дүниежүзілік уран өндірісі 48 332 тоннаны құрады, оның 21 819 тоннасы Қазақстанда өндірілді. Уран өндіретін басқа маңызды елдер: Намибия, Канада, Австралия, Өзбекстан және Ресей.

Уран кені бірнеше жолмен өндіріледі: ашық, жерасты, жерасты сілтісіздігі және ұңғымаларды өндіру. Өндірілетін төмен сұрыпты уран кенінде әдетте 0,01-0,25% уран оксидтері болады. Металды оның кенінен алу үшін ауқымды шараларды қолдану қажет. Канаданың Саскачеван қаласындағы Атабасқа бассейнінің кен орындарында табылған жоғары сортты кендерде орташа есеппен 23%-ға дейін уран оксиді болуы мүмкін. Уран рудасы ұсақталып, майда ұнтаққа айналады, содан кейін қышқылмен немесе сілтімен шайылады. Ағынды су тұндырудың, еріткіштерді алудың және ион алмасудың бірнеше реттілігінің біріне ұшырайды. Сары торт деп аталатын алынған қоспаның құрамында кем дегенде 75% уран оксидтері  $U_3O_8$  бар. Содан кейін сары торт тазарту және түрлендіру алдында ұнтақтау процесіндегі қоспаларды кетіру үшін күйдіріледі.

Коммерциялық дәрежедегі уран галоген уранды сілтілі немесе сілтілі жер металдарымен тотықсыздандыру арқылы алынуы мүмкін [3].

### *Уран*

Уран – символы U және атомдық нөмері 92 болатын химиялық элемент. Периодтық жүйенің актинидтер қатарындағы күміс – сұр түсті металл. Уран атомында 92 протон және 92 электрон бар, оның ішінде 6 валенттілік электрон. Уран альфа – бөлшек шығару арқылы радиоактивті ыдырайды. Бұл ыдыраудың жартылай ыдырау периоды әртүрлі изотоптар үшін 159, 200-ден 4,5 миллиард жылға дейін өзгереді. Ең көп таралған изотоптар табиғи уран – уран-238 (оның құрамында 146 нейтрон бар және жердегі уранның 99%-дан астамы бар) және уран-235. Уран алғашқы кезде кездесетін элементтердің ең жоғары атомдық салмағына ие. Оның тығыздығы қорғасыннан шамамен 70% жоғары, ал алтын немесе вольфрамнан сәл төмен. Табиғи жағдайда топырақта, тау жыныстарында және суда миллионға бірнеше бөліктен тұратын төмен концентрацияларда

кездеседі және ураны бар минералдардан, мысалы ураниниттен коммерциялық түрде алынады.

Уранның көптеген заманауи қолдаулары оның бірегей ядролық қасиеттерін пайдаланады. Уран-235 жалғыз табиғи түрде бөлінетін изотоп болып табылады, бұл оны атом электр станциялары мен ядролық қаруларда кеңінен қолдануға мүмкіндік береді. Алайда, табиғатта аздаған концентрациялар болғандықтан, уран-235 жеткілікті болуы үшін уран байытудан өтуі керек. Уран-238 жылдам нейтрондармен бөлінетін және құнарлы, яғни ядролық реакторда бөлінетін плутоний – 239-ға ауысуы мүмкін.

Табиға торийден тағы бір бөлінетін изотопты уран-233 алуға болады және болашақта ядролық технологияда өнеркәсіпте пайдалану үшін зерттеледі. Уран-238 жылдам нейтрондармен өздігінен бөліну немесе тіпті индукциялық бөліну ықтималдығы аз, уран-235 және аз дәрежеде уран-233 баяу нейтрондар үшін бөліну қимасы әлдеқайда жоғары. Жеткілікті концентрацияда бұл изотоптар тұрақты ядролық тізбекті реакцияны сақтайды. Бұл атомдық энергетикалық реакторлардағы жылуды тудырады және ядролық қару үшін ыдырайтын материалды шығарады.

Азаматтық секторда уранның негізгі пайдалануы атом электр станцияларын отынмен қамтамасыз ету болып табылады. Бір киллограм уран-235 теориялық тұрғыдан шамамен 20 тераджоуль энергия өндіре алады.

Уранның радиоактивтілігінің ашылуы элементтің қосымша ғылыми және практикалық қолданылуына жол ашты. Уран-238 изотопының ұзақ жартылай шығарылу кезеңі оны ең ерте магмалық жыныстардың жасын бағалауда және радиометриялық анықтаудың басқа түрлерін, соның ішінде уран-торий, уран-қорғасынды анықтауды қолдану үшін өте қолайлы етеді. Уран металы жоғары энергиялы рентгендік нысаналар үшін қолданылады [4].

### *Адамға әсер ету*

Адамға уран аудағы шаңды жұту немесе ластанған су мен тағамды жұту арқылы әсер етуі мүмкін. Ауадағы уран мөлшері әдетте өте аз, дегенмен фосфатты тыңайтқыштарды өңдейтін зауыттарда жұмыс істейтін, ядролық қару жасаған немесе сынаған мемлекеттік мекемелердің жанында тұратын, таусылған уран қарулы қолданылған заманауи ұрыс алаңының маңында тұратын немесе жұмыс істейтін адамдар немесе көмір жағуға жақын жерде тұрады немесе жұмыс істейді. Электр станциясы, уран кенін өндіретін не өңдейтін не реактор отыны үшін уранды байытатын қондырғылар уранның әсерін арттыруы мүмкін. Уран шөгінділерінің үстінде орналасқан үйлер немесе құрылыстар радон газының әсер ету жиілігін арттыруы мүмкін. Еңбекті қорғау және қауіпсіздік басқармасы 8 сағаттық жұмыс күнінде жұмыс орнында уранның әсер етуінің рұқсат етілген шегін  $0,25 \text{ мг/м}^3$  деп белгіледі. Ұлттық еңбек қауіпсіздігі және еңбекті қорғау институты 8 сағаттық жұмыс күні ішінде  $0,2 \text{ мг/м}^3$  және қысқа мерзімді шекті  $0,6 \text{ мг/м}^3$  мөлшерінде ұсынылатын әсер ету шегін белгіледі.  $10 \text{ мг/м}^3$  деңгейінде уран өмір мен денсаулық үшін бірден қауіпті.

Жұтылған уранның көп бөлігі ас қорту кезінде шығарылады. Уранның ерімейтін түрлері мысалы, оның оксиді жұтқанда тек 0,5% сіңеді, ал еритін уранил ионының сіңірілуі 5% дейін болуы мүмкін. Дегенмен, еритін уран қосылыстары дене арқылы тез өтеді, ал ерімейтін уран қосылыстары, әсіре шаң арқылы өкпеге дем алғанда, әсер ету қауіпін арттырады. Қанға түскеннен кейін сіңірілген уран биоаккумуляцияға бейім болады және уранның фосфаттарға жақындығына байланысты сүйек тінінде ұзақ жылдар бойы сақталады. Біріктірілген уран уранилге айналады.

Уранның радиологиялық және химиялық уыттылығы жоғары атомдық нөмірі  $Z$  элементтерінің табиғи гамма және рентген сәулелерін сіңіру және уранның жоғары жақындығымен үйлесетін фотоэлектрондарды қайта шығару арқылы фантомдық немесе қайталама радиоуыттылық танытуымен біріктіріледі. ДНҚ-ның фосфатты бөлігіне бір және қос тізбекті ДНҚ үзілістерінің көбеюіне әкеледі [6].

### *Жанармай*

Зерттеу реакторының отыны қуатты реактор отынына қарағанда жоғары (әдетте шамамен 20%) байытылған. Бұл жоғары талдауы төмен байытылған уран (HALEU), яғни оның құрамында U-238 аз, демек, пайдаланылған отынның актинидтері аз және радиоактивті ыдыраудан болатын жылу аз. Бөліну өнімдерінің үлесі пайдаланылған қуатты реактор отынынан айтарлықтай ерекшеленбейді.

Отын жинақтары әдетте таза алюминиймен қапталған уран-алюминий қорытпасының (U-Al) тақталары немесе цилиндрлері болып табылады. Олар қуатты реакторларда қолданылатын Циркалой қаптамасымен қапталған керамикалық  $UO_2$  түйіршіктерінен ерекшеленеді. Зерттеу реакторына отын құю үшін тек бірнеше килограмм уран қажет, бірақ қуатты реактордағы жүз тоннамен салыстырғанда әлдеқайда байытылған. Зерттеу реакторлары әдетте төмен температурада (салқындатқыш сұйықтық  $100^{\circ}C$  төмен) жұмыс істейді, бірақ жұмыс жағдайлары басқа жолдармен ауыр. Күшті реактордың отыны шамамен 5 кВт/3 қуат тығыздығында жұмыс істейтін болса, зерттеу реакторының отыны отын етінде 17 кВт/кк. Болуы мүмкін. Сондай-ақ жану өте жоғары, сондықтан жанармай бөлінуден болатын құрылымдық зақымға төтеп беріп, бөліну өнімдерін көбірек орналастыруы керек.

Ресейде жобаланған бес зерттеу реакторы жоғары байытылған уранилсульфатты сұйық отынды пайдаланады. Өзбекстандағы біреуі 2014 жылы қолданыстан шығарылып, жанармай ұшағымен Маякқа жеткізілді.

2016 жылы Польшаның 30 МВт Мария реакторы 2014 жылы толығымен HALEU-ге ауыстырылғаннан кейін Польшадан келген 700 кг HEU отынының соңғысы қосылды. Ал 2010 жылдың қаңтарына дейін Еуропадан, Израильден АҚШ-тан шыққан 1240 кг HEU отыны қайтарылды. Түркия, Латын Америкасы, Жапония және Оңтүстік-Шығыс Азия. Содан бері осы елдердің кейбірінен және Бельгиядан, Италиядан, Чилиден, Мексикадан, Украинадан, Оңтүстік

Африкадан және Австриядан көбірек келді. 2016 жылдың ортасында Жапонияның жылдам сыни ассамблеясынан тағы бірнеше жүз килограмм плутониймен бірге қайтарылды. 2015-19 жылдары Канаданың Чалк өзеніндегі (Онтарио) екі зерттеу реакторынан алынған 200 кг-нан астам HEU Оңтүстік Каролинадағы Саванна өзеніне тасымалданды.

Қытай 2016 жылы АҚШ-тың NNSA және Аргонна ұлттық зертханасымен серіктесе отырып, өзінің шағын нейтрондық көзді реакторларының (MNSRs) біріншісін тығыздық LEU отынына айналдырды. Басқа MNSR Қытайда, Ганада, Нигерияда, Иранда, Пәкістанда және Сирияда. Шағын нейтрондық көзді реакторлар ядросында шамамен бір килограмм 90% байытылған отын бар. Гана мен Нигериядан келген HEU кем дегенде Қытай атом энергиясы институтына қайтарылды.

2012 жылы Бельгия, Франция, Оңтүстік Корея және АҚШ Корея атом энергиясын зерттеу институты (KAERI) әзірлеген орталықтан тепкіш атомизация технологиясын пайдалана отырып, жоғары тығыздықтағы HALEU отын өндіру технологиясын әзірлеуде ынтымақтастыққа келісті. АҚШ 2013 жылдың маусым айында KAERI-ге 100 кг атомдалған U-Mo ұнтағын өндіру үшін 110 кг HALEU берді. 2014 жылдың қаңтарында ұнтақ Ареваның зерттеу реакторының отын өндірушісі CERCA компаниясы отын элементтерін жасау үшін Францияға жөнелтілді. Осы монолитті HALEU-Mo жанармайын сынау Айдахо ұлттық зертханасының (INL) жетілдірілген сынақ реакторында 2015 жылдың қазан айында басталды және 2017 жылдың сәуірінде KAERI бұл тексеру сынақтарының сәтті аяқталғанын жариялады.

Бұл монолитті HALEU-Mo отыны алюминийдегі U-Mo дисперсиясының орнына 10% Mo бар таза металл болып табылады. Уран тығыздығы  $15,6 \text{ г/см}^3$  құрайды және бұл әлемдегі әрбір зерттеу реакторына өнімділігін жоғалтпай HEU отынынан HALEU отынына түрлендіруге мүмкіндік береді. 2017 жылдың желтоқсан айында NNSA HALEU-Mo монолитті отынның алдын ала есебін Ядролық реттеу комиссиясына оның біліктілігін арттырудың және АҚШ-тың қалған алты жоғары өнімді зерттеу реакторын HEU отынынан түрлендірудің алғашқы қадамы ретінде ұсынды. 2020 жылдың ақпан айында NNSA BWX Technologies компаниясына Вирджиния штатындағы Линчбургте HALEU-Mo отын өндіруге дайындалу үшін келісімшарт жасады [7].

### *Пайдалану*

Нейтрон сәулелері атомдық деңгейдегі материалдардың құрылымы мен динамикасын зерттеуге ерекше сәйкес келеді. Нейтрондардың шашырауы үлгілерді вакуумдық қысымның ауытқуы, жоғары температура, төмен температура және магнит өрісі сияқты нақты жағдайларда зерттеу үшін қолданылады.

Нейтронды активтендіру талдауын қолдана отырып, элементтің ең аз мөлшерін өлшеуге болады. Үлгідегі атомдар реактордағы нейтрондардың

әсерінен радиоактивті болады. Содан кейін әр элемент шығаратын сипаттамалық сәулеленуді анықтауға болады.

Нейтронды белсендіру - тұрақты материалды радиоактивті етудің жалғыз кең таралған әдісі. Ол белгілі бір элементтерді нейтрондармен бомбалау арқылы өнеркәсіпте және медицинада кеңінен қолданылатын Радиоизотоптарды өндіру үшін қолданылады, осылайша мақсатты ядроға нейтрон қосылады. Мысалы, бауыр қатерлі ісігін емдеуге арналған иттрий-90 микросфералары иттрий-89 нейтронды бомбалау арқылы жасалады.

Нейтрондардың активтенуі бөлінуге әкелуі мүмкін. Ядролық медицинада ең көп қолданылатын изотоп-Технеций-99м, молибденнің ыдырау өнімі-99.

Зерттеу реакторларын өнеркәсіптік өңдеу үшін де пайдалануға болады. Нейтронды трансмутациялық допинг (NTD) кремнийдің қасиеттерін өзгертіп, оны электр тогын өте өткізгіш етеді. Құйма тәрізді кремнийдің үлкен монокристалдары реактор рефлекторының корпусының ішінде сәулеленеді. Мұнда нейтрондар әр миллиардтан бір кремний атомын фосфорға айналдырады. Сәулеленген кремний чиптерге кесіліп, әр түрлі жетілдірілген компьютерлік қосымшалар үшін қолданылады. NTD электр энергиясының кремний өткізгіштігінің тиімділігін арттырады, бұл электроника өнеркәсібі үшін маңызды сипаттама.

Материалдарды сынау реакторларында (MTR) материалдар өзгерістерді зерттеу үшін қарқынды нейтрондық сәулеленуден өтеді. Мысалы, кейбір болаттар сынғыш болады және ядролық реакторларда сынғышқа төзімді қорытпалар қолданылуы керек. Францияның Кадараш қаласында қуаты 100 МВт Жюль Хоровиц реакторының құрылысы жөніндегі халықаралық жоба IV буын Атом станциялары үшін өмірлік маңызы бар материалдарды зерттеуге мүмкіндік береді. Ол нейтрондардың өте жоғары ағынын шығаруға арналған - Француз MTR Osiris-тен шамамен екі есе көп. 2014 жылдың соңындағы жағдай бойынша жалпы құрылыс жұмыстары 80% - дан астам аяқталды және қазір сынақ ілмектері жабдықталуда. Ол 2021 жылы пайдалануға берілуі керек. Қазіргі уақытта бельгиялық BR2 Еуропадағы ең үлкен MTR болып табылады [8].

## **1.2 Мемлекеттер бойынша ядролық реакторлар туралы мәліметтер**

### *Солтүстік Америка*

Канадада жалпы қуаттылығы 13,6 ГВт болатын 19 жұмыс істейтін ядролық реакторлар бар. 2021 жылы атом энергиясы елдегі электр энергиясының 14,3%-ын өндірді.

Елдегі 19 ядролық реактордың біреуінен басқасы Онтариода орналасқан. Оның он бірлігі – алтауы Брюстегі және төртеуі Дарлингтондағы – жөндеуден өтуі керек. Бағдарлама пайдалану мерзімін 30-35 жылға ұзартады. Осындай жөндеу жұмыстары Онтариоға 2014 жылы көмірден бас тартуға мүмкіндік беріп, әлемдегі ең таза электр қоспаларының біріне қол жеткізді. Мексикада жалпы

қуаттылығы 1,6 ГВт болатын екі жұмыс істейтін ядролық реакторы бар. 2021 жылы атом энергиясы елдегі электр энергиясының 5,3% өндірді.

АҚШ-та 92 жұмыс істейтін ядролық реакторлар бар, олардың жалпы қуаттылығы 94,7 ГВт. 2021 жылы атом энергиясы елдегі электр энергиясының 19,6% өндірді.

Құрылыс үстінде төрт AP1000 реакторы болды, бірақ олардың екеуі тоқтатылды. АҚШ-тағы жаңа құрылыстағы үзіліс себептерінің бірі техникалық қызмет көрсету стратегияларындағы өте сәтті эволюция болды. Соңғы 15 жылда жақсартылған операциялық көрсеткіштер АҚШ-тың атом электр станцияларын пайдалануды ұлғайтты, өндірілген өнім 1000 МВт жаңа 19 стансаның салынуына баламалы өсті [9].

### *Оңтүстік Америка*

Аргентинада жалпы қуаттылығы 1,6 ГВт болатын үш реактор бар. 2021 жылы ел электр қуатының 7,2 пайызын ядролық қуаттан өндірді.

Бразилияда екі реактор бар, олардың жалпы қуаттылығы 1,9 ГВт. 2021 жылы ядролық энергия елдегі электр энергиясының 2,4%-ын өндірді [9].

### *Батыс және Орталық Еуропа*

Бельгияда жұмыс істейтін жеті ядролық реактор бар, олардың жалпы қуаттылығы 5,9 ГВт. 2021 жылы атом энергиясы елдегі электр энергиясының 50,8%-ын өндірді.

Финляндияда жалпы қуаттылығы 4,4 ГВт болатын бес жұмыс істейтін ядролық реакторлар бар. 2021 жылы атом энергиясы елдегі электр энергиясының 32,8 пайызын өндірді. Финляндияның бесінші реакторы – 1600 МВт (таза) EPR – электр желісіне 2022 жылдың наурыз айында қосылды.

Францияда 56 жұмыс істейтін ядролық реакторлар бар, олардың жалпы қуаттылығы 61,4 ГВт. 2021 жылы атом энергиясы елдегі электр энергиясының 69,0%-ын өндірді.

2015 жылғы энергетикалық саясат елдегі атом өндірісінің үлесін 2025 жылға қарай 50%-ға дейін төмендетуді көздеді. Енді бұл мақсат 2035 жылға шегерілді. Елдің энергетика министрі бұл мақсат шындыққа жанаспайды және бұл елдегі көмірқышқыл газын көбейтетінін айтты. шығарындылар, жеткізу қауіпсіздігіне қауіп төндіреді және жұмыс орындарын тәуекелге ұшыратады.

Қазір Францияда бір реактор салынып жатыр – Фламанвиллдегі 1750 МВт ЭПР.

Германияда жалпы қуаттылығы 4,1 ГВт болатын үш ядролық энергетикалық реакторлар жұмысын жалғастыруда. 2021 жылы ядролық энергия елдегі электр энергиясының 11,9%-ын өндірді.

Германия өзінің саясатының бір бөлігі ретінде 2022 жылдың соңына қарай ядролық генерацияны тоқтатады. 2011 жылы, саясат енгізілгеннен кейінгі жылы



Германия 809 миллион тонна CO<sub>2</sub> шығарады, 2020 жылы ел 644 миллион тонна CO<sub>2</sub> шығарды және CO<sub>2</sub> мөлшері бойынша әлемде жетінші орында болды.

Нидерландыда таза қуаттылығы 0,5 ГВт болатын жалғыз жұмыс істейтін ядролық реактор бар. 2021 жылы ядролық энергия елдегі электр энергиясының 3,1% өндірді.

Испанияда жалпы қуаттылығы 7,1 ГВт болатын жеті жұмыс істейтін ядролық реактор бар. 2021 жылы атом энергиясы елдегі электр энергиясының 20,8%-ын өндірді.

Швецияда жалпы қуаттылығы 6,9 ГВт болатын алты жұмыс істейтін ядролық реакторы бар. 2021 жылы атом энергиясы елдегі электр энергиясының 30,8%-ын өндірді.

Ел кейбір ескі реакторларды жауып жатыр, бірақ жұмыс істеу мерзімін ұзарту мен жаңартуға көп қаржы жұмсады.

Швейцарияда жалпы қуаттылығы 3,0 ГВт болатын төрт жұмыс істейтін ядролық реактор бар. 2021 жылы атом энергиясы елдегі электр энергиясының 28,8 пайызын өндірді.

Біріккен Корольдікте жұмыс істейтін 9 ядролық реактор бар, олардың жиынтық таза қуаты 5,9 ГВт. 2021 жылы атом энергиясы елдегі электр энергиясының 14,8%-ын өндірді [9].

### *Орталық және Шығыс Еуропа, Ресей*

Арменияда қуаттылығы 0,4 ГВт болатын жалғыз ядролық энергетикалық реактор бар. 2021 жылы атом энергиясы елдегі электр энергиясының 25,3%-ын өндірді.

Беларусьте 2020 жылдың қарашасында желіге қосылған бір жұмыс істейтін ядролық энергетикалық реактор және құрылысы жүріп жатқан екінші реактор бар. Елдегі қалған электр энергиясының барлығы дерлік табиғи газдан өндіріледі. 2021 жылы атом энергиясы елдегі электр энергиясының 14,1% өндірді.

Болгарияда қосылатын таза қуаты 2,0 ГВт болатын екі жұмыс істейтін ядролық реактор бар. 2021 жылы атом энергиясы елдегі электр энергиясының 34,6% өндірді.

Чехияда жалпы қуаттылығы 3,9 ГВт болатын алты жұмыс істейтін ядролық реактор бар. 2021 жылы атом энергиясы елдегі электр энергиясының 36,6% өндірді.

Венгрияда жалпы қуаттылығы 1,9 ГВт болатын төрт жұмыс істейтін ядролық реактор бар. 2021 жылы атом энергиясы елдегі электр энергиясының 46,8 пайызын өндірді.

Румынияда қос жұмыс істейтін екі ядролық реактор бар, олардың жалпы қуаттылығы 1,3 ГВт. 2021 жылы атом энергиясы елдегі электр энергиясының 18,5% өндірді.

Ресейде жалпы қуаттылығы 27,7 ГВт болатын 37 жұмыс істейтін ядролық реакторлар бар. 2021 жылы атом энергиясы елдегі электр энергиясының 20,0%-ын өндірді.

Үкіметтің 2016 жылғы қаулысында 2030 жылға қарай құрылысы жүріп жатқан 11 атомдық реакторлардың құрылысы көрсетілген. 2022 жылдың басында Ресейде жалпы қуаты 2,6 ГВт болатын үш реактор салынып жатыр.

Ресейдің атом өнеркәсібінің күші оның жаңа реакторлар үшін экспорттық нарықтағы үстемдігінен көрінеді. Елдің ұлттық атом өнеркәсібі қазіргі уақытта Беларусь, Қытай, Венгрия, Үндістан, Иран және Түркиядағы жаңа реакторлық жобаларға және әртүрлі дәрежеде Алжирде, Бангладеште, Боливияда, Индонезияда, Иорданияда, Қазақстанда, Нигерияда, Оңтүстік Африкада инвестор ретінде қатысады. Тәжікстан, Өзбекстан, т.б.

Словакияда жалпы қуаттылығы 1,8 ГВт болатын төрт жұмыс істейтін ядролық реактор бар. 2021 жылы атом энергиясы елдегі электр энергиясының 52,3% өндірді. Тағы екі қондырғының құрылысы жүріп жатыр.

Словенияда таза қуаттылығы 0,7 ГВт болатын жалғыз жұмыс істейтін ядролық реактор бар. 2021 жылы Словения электр қуатының 36,9 пайызын ядролық қуаттан өндірді.

Украинада жалпы қуаттылығы 13,1 ГВт болатын 15 жұмыс істейтін ядролық реакторлар бар. 2021 жылы атом энергиясы елдегі электр энергиясының 55,0%-ын өндірді.

Түркия өзінің алғашқы атом электр станциясының құрылысын 2018 жылдың сәуір айында бастады, іске қосылуы 2023 жылы басталады деп күтілуде [9].

### *Азия*

Бангладеш жоспарланған екі ресейлік VVER-1200 реакторының біріншісінің құрылысын 2017 жылы бастады. Екіншісінің құрылысы 2018 жылы басталды. Ол бірінші блокты 2023 жылға қарай іске қосуды жоспарлап отыр. Қазіргі уақытта ел электр қуатының барлығын дерлік қазба отынынан өндіреді.

Қытайда 55 жұмыс істейтін ядролық реакторлар бар, олардың жалпы қуаттылығы 53,3 ГВт. 2021 жылы ядролық энергия елдегі электр энергиясының 5,0%-ын өндірді.

Ел 2022 жылдың шілде айының соңында салынып жатқан 21 реакторымен жаңа ядролық құрылыс нарығында үстемдік етуді жалғастыруда. 2018 жылы Қытай екі жаңа жобаны – AP1000 және EPR-ды пайдалануға берген бірінші ел болды. Қытай негізінен жергілікті реактор дизайны болып табылатын Hualong One-ды экспортқа шығарады.

Қытайда жаңа ядролық энергетиканы дамытуға күшті серпін қала ауасының сапасын жақсарту және парниктік газдар шығарындыларын азайту қажеттілігінен туындады.

Үндістанда 22 жұмыс істейтін ядролық реакторлар бар, олардың жалпы қуаттылығы 6,8ГВт. 2021 жылы атом энергиясы елдегі электр энергиясының 3,2% өндірді.

Үндістан үкіметі инфрақұрылымды дамытудың ауқымды бағдарламасының бір бөлігі ретінде өзінің ядролық қуатын арттыруға ұмтылады. 2010 жылы үкімет 2024 жылға қарай онлайн режимінде 14,6 ГВт ядролық қуатқа ие болу туралы өршіл мақсат қойды. 2022 жылдың шілде айының соңында Үндістанда жалпы қуаты 6,7 ГВт болатын сегіз реактордың құрылысы жүргізілуде.

Жапонияда 33 жұмыс істейтін ядролық реакторлар бар, олардың жалпы қуаттылығы 31,7 ГВт. 2022 жылдың наурыз айындағы жағдай бойынша, 2011 жылы Фукусима апатынан кейін 10 реактор қайта іске қосылды, тағы 15 реактор қайта іске қосылуға рұқсат беру процесінде. Бұрын елдегі электр энергиясының 30%-ы ядролық энергиядан алынған, 2021 жылы бұл көрсеткіш небәрі 7,2%-ды құрады.

Оңтүстік Кореяда 25 жұмыс істейтін ядролық реактор бар, олардың жалпы қуаттылығы 24,4 ГВт. 2021 жылы атом энергиясы елдегі электр энергиясының 28,0%-ын өндірді.

Елде үш жаңа реактор салынып жатыр және Біріккен Араб Әмірліктерінде төрт блоктан тұратын зауыт салынып жатыр.

Пәкістанның жалпы қуаттылығы 3,3 ГВт болатын алты жұмыс істейтін ядролық реакторы бар. 2021 жылы атом энергиясы елдегі электр энергиясының 10,6% өндірді. Пәкістанда бір қытайлық Hualong One қондырғысы салынып жатыр, ол бірінші сынға 2022 жылдың ақпанында жетті [9].

### *Африка*

Мысыр 2022 жылдың шілдесінде Жерорта теңізі жағалауындағы Эль-Дабба алаңында салынатын ресейлік жобаланған төрт VVER қондырғысының біріншісінің құрылысын бастады. Екінші блоктың құрылысы 2022 жылдың қарашасында басталды. Барлық төрт реактор 2030 жылға қарай іске қосылады деп күтілуде.

Оңтүстік Африкада екі жұмыс істейтін ядролық реакторы бар, олардың жалпы қуаттылығы 1,9 ГВт және қазіргі уақытта ядролық энергиядан электр энергиясын өндіретін жалғыз африкалық ел. 2021 жылы ядролық энергия елдегі электр энергиясының 6,0%-ын өндірді. Оңтүстік Африка одан әрі қуаттылық жоспарларына берік, бірақ қаржыландыруға қатысты шектеулер айтарлықтай [9].

### *Таяу шығыс*

Иранның таза қуаты 0,9 ГВт болатын жалғыз жұмыс істейтін ядролық реакторы бар. 2021 жылы ядролық энергия елдегі электр энергиясының 1,0%-ын өндірді. Ресейде жасалған екінші VVER-1000 қондырғысы салынуда.

Біріккен Араб Әмірліктерінде қуаты 4,0 ГВт жұмыс істейтін үш ядролық реактор бар. Дәл осы зауытта (Барака) төртінші қондырғы салынууда. 2021 жылы ядролық энергия елдегі электр энергиясының 1,3%-ын өндірді [9].

### **1.3 Бүгінгі әлемдегі ядролық энергетика 2021-2023 жылдардағы жаңартылған ақпарат бойынша**

- Әлемдегі көптеген ядролық реакторлар зерттеу және оқыту, материалдарды сынау немесе медицина мен өнеркәсіп үшін радиоизотоптар жасау үшін қолданылады. Бұл нейтрондық зауыттар.

- Олар энергетикалық реакторларға немесе кеме қозғалтқыштарына қарағанда әлдеқайда аз және олардың көпшілігі кампустарда.

- Мұндай реакторлар 53 елде шамамен 220-сы жұмыс істейді.

- Олардың кейбіреулері жоғары байытылған уран отынымен жұмыс істейді және халықаралық күш-жігердің арқасында олардың көпшілігі төмен байытылған, жоғары сынамалы отынмен ауыстырылды. Кейбір радиоизотоптар өндірісі нейтрондардың нысаны ретінде жоғары байытылған уранды пайдаланады және төмен байытылған уранның пайдасына біртіндеп жойылады.

Зерттеу реакторларының негізгі мақсаты - зерттеу және басқа мақсаттар үшін нейтрондардың көзін қамтамасыз ету. Олардың шығымы (нейтрондық сәулелер) қолдануға байланысты әр түрлі сипаттамаларға ие болуы мүмкін. Олар негізінен таза энергия тұтынушылары. Олардың қуаты мегаватт (немесе киловатт) жылу (Мвт немесе МВт) арқылы белгіленеді, бірақ біз мұнда тек Вт (немесе кВт) қолданамыз. Шын мәнінде, әлемдегі 250 зерттеу реакторының жалпы қуаты 3000 МВт-тан сәл асады.

Зерттеу реакторлары энергетикалық реакторларға қарағанда қарапайым және төмен температурада жұмыс істейді. Олар әлдеқайда аз отынды қажет етеді және отын пайдаланылған кезде бөліну өнімдері әлдеқайда аз болады. Екінші жағынан, олардың отыны жоғары байытылған уранды қажет етеді, әдетте 20% U-235 дейін, төмен байытылған жоғары сынамалы уран (HALEU) деп аталады, Дегенмен кейбір ескілері әлі де 93% U-235 пайдаланады. Сондай-ақ, олар ядрода өте жоғары меншікті қуатқа ие, бұл арнайы дизайн ерекшеліктерін қажет етеді. Энергетикалық реакторлар сияқты, ядро салқындатуды қажет етеді, әдетте пассивті және тек жоғары қуатты сынақ реакторлары мәжбүрлі салқындатуды қажет етеді. Әдетте нейтрондарды бәсеңдету және бөлінуді күшейту үшін модератор қажет. Нейтрондарды өндіру олардың негізгі функциясы болғандықтан, зерттеу реакторларының көпшілігі белсенді аймақтан нейтрондардың жоғалуын азайту үшін рефлекторды қажет етеді.

Әлемдегі барлық дерлік зерттеу реакторлары жылу (баяу) нейтрондарда жұмыс істейді; Ресей Димитровградтағы БОР-60-бұл жылдам нейтрондардағы жалғыз зерттеу реакторы деп мәлімдейді. Ол 1969 жылы іске қосылды және оны 2020 жылдың аяғынан кейін төрт есе сәулелену қуатымен ауыстыру керек. Әлемде жылдам реакторлар үшін, әсіресе IV буын реакторларын жасау үшін жылдам нейтронды материалдарды сынау үшін зерттеу қуаты жетіспейді. 2018

жылдың ақпанында АҚШ Өкілдер палатасы қабылдаған екі жақты заң жобасы "2026 жылға қарай Ұлттық пайдаланушы нысаны ретінде жұмыс істейтін реакторға негізделген жылдам нейтрондардың әмбебап көзін" салуға 2 миллиард доллар бөлді. Бұл қуаты кемінде 300 МВт болатын "реакторлардың, материалдардың және ядролық отынның перспективалық конструкцияларын әзірлеу" үшін зерттеу реакторы болады.

2021 жылдың маусымындағы жағдай бойынша халықаралық Атом энергиясы агенттігінің зерттеу реакторларының дерекқоры 223 белсенді зерттеу реакторының, 11-і салынып жатқанын, 16-сы жоспарланғанын, 27-сі уақытша немесе ұзақ мерзімге тоқтатылғанын, 58-і біржола тоқтатылғанын және 511-і пайдаланудан шығарылғанын немесе пайдаланудан шығару процесінде екенін көрсетті. Белсенді және уақытша тоқтатылған зерттеу реакторларының көпшілігінің уақыты 40 жылдан асады.

Зерттеу реакторлары энергетикалық реакторларға қарағанда әлдеқайда кең құрылымдарды пайдаланады, мұнда әлемдегі станциялардың 80% -ы тек екі ұқсас түрге жатады. Олар сондай-ақ тұрақты немесе импульсті болуы мүмкін энергияны өндіретін әртүрлі жұмыс режимдеріне ие.

Жалпы құрылым (47 бірлік) бассейн типті реактор болып табылады, онда белсенді аймақ үлкен су бассейнінде орналасқан жылу бөлетін элементтер тобы болып табылады. Жанармай құю станцияларының арасында эксперименттік материалдарға арналған реттегіш шыбықтар мен бос арналар бар. Әрбір элементтік қорапта алюминий жабыны бар бірнеше (мысалы, 18) қисық отын тақталарынан тұрады. Су реакторды баяулатады және салқындатады, ал рефлектор әдетте графит немесе бериллийді пайдаланады, бірақ басқа материалдарды да қолдануға болады. Бассейн қабырғасында нейтрондық сәулелерге қол жеткізу үшін тесіктер орнатылған. Резервуар түріндегі зерттеу реакторлары (21 дана) ұқсас, тек салқындату белсендірек.

Зерттеу реакторларының қолдану аясы кең, соның ішінде материалдарды талдау және сынау және радиоизотоптар өндірісі. Олардың мүмкіндіктері көптеген салаларда, ядролық өнеркәсіпте, сондай-ақ термоядролық зерттеулерде, экологияда, озық материалдарды әзірлеуде, дәрі-дәрмектерді әзірлеуде және ядролық медицинада қолданылады.

Қазіргі уақытта төрт жоғары ағынды зерттеу реакторы жұмыс істейді: Петтендегі (Нидерланды) 45 МВт жоғары ағынды реактор, оның қызмет ету мерзімі аяқталады, Ок-Ридж ұлттық зертханасында (АҚШ) жаңартылған 85 МВт жоғары ағынды изотоптық реактор, 20 МВт Heinz Maier-Leibnitz FRM II (Германия) және Санкт-Петербургтегі (Ресей) қуаты 100 МВт жоғары ағынды реактор.

Зерттеу реакторларының көпшілігі (160-тан астам) негізінен зерттеуге арналған, бірақ кейбіреулері радиоизотоптар шығаруы мүмкін. Қымбат ғылыми қондырғылар болғандықтан, олар көп мақсатты болып келеді және олардың көпшілігі 30 жылдан астам жұмыс істейді.

Әлемде 820-ға жуық зерттеу және сынақ реакторлары салынды, олардың 307-сі АҚШ-та, 121-і Ресейде.

2020 жылы белсенді зерттеу реакторларының ең көп саны Ресейде, одан кейін АҚШ-та. Көптеген зерттеу реакторлары 1960-1970 жылдары салынған. Операциялардың ең жоғары саны 1975 жылы 55 елде 373 болған [12].

*Бүгінгі әлемдегі ядролық энергетика 2023 жылдың ақпанында жаңартылған ақпарат бойынша*

Алғашқы коммерциялық атом электр станциялары 1950 жылдары жұмыс істей бастады.

Атом энергиясы қазір 440-қа жуық энергетикалық реактордан әлемдегі электр энергиясының 10%-ға жуығын қамтамасыз етеді.

Ядролық энергия төмен көміртекті энергияның әлемдегі екінші ірі көзі болып табылады (2019 жылғы жалпы көлемнің 28%).

50-ден астам ел ядролық энергияны 220-ға жуық зерттеу реакторларында пайдаланады. Зерттеулерден басқа бұл реакторлар медициналық және өнеркәсіптік изотоптарды алу үшін, сондай-ақ оқыту үшін қолданылады.

Ядролық технология белгілі бір элементтердің атомдарын бөлу арқылы бөлінетін энергияны пайдаланады. Ол алғаш рет 1940 жылдары әзірленді, ал Екінші дүниежүзілік соғыс кезінде зерттеулер бастапқыда бомба өндіруге бағытталған. 1950 жылдары ядролық ыдырауды бейбіт мақсатта пайдалануға, оны энергия өндіруге бақылауға назар аударылды.

Азаматтық ядролық энергетика қазір 18 000 реакторлық жыл тәжірибесімен мақтана алады және атом электр станциялары әлемнің 32 елінде жұмыс істейді. Шын мәнінде, аймақтық электр жеткізу желілері арқылы көптеген елдер ішінара ядролық энергияға тәуелді. Мысалы, Италия мен Дания электр қуатының 10%-ға жуығын импортталған атом энергиясынан алады.

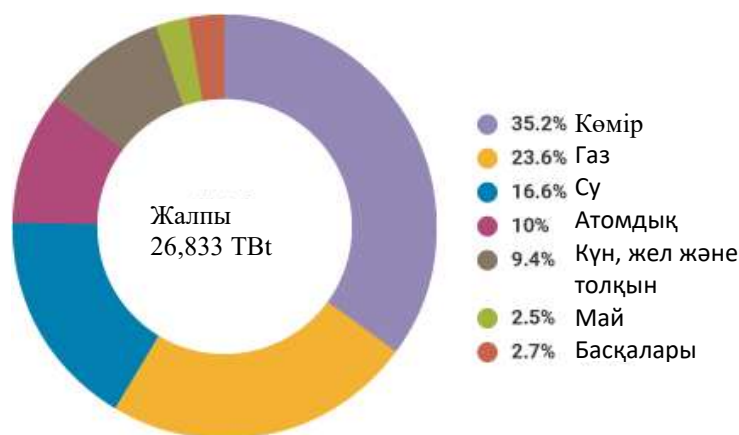
Ядролық технологияны қолдану төмен көміртекті энергиямен қамтамасыз етуден де асып түседі. Ол аурудың таралуын бақылауға көмектеседі, дәрігерлерге науқастарды диагностикалауға және емдеуге көмектеседі және ғарышты зерттеудегі ең өршіл миссияларымызға қуат береді. Бұл әртүрлі қолданулар ядролық технологияларды тұрақты дамуға қол жеткізуге бағытталған әлемдік күш-жігердің негізінде орналастырады.

2021 жылы атом станциялары 2020 жылғы 2553 ТВт/сағ электр энергиясын 2653 ТВт/сағ қамтамасыз етті(1 сурет).



1 сурет - Ядролық электр энергиясын өндіру (Дүниежүзілік ядролық қауымдастық)

2020 жылы он үш ел электр қуатының кем дегенде төрттен бірін ядролық энергиядан өндірді (2 сурет). Франция электр энергиясының шамамен 70%-ын атом энергиясынан алады, ал Украина, Словакия, Бельгия және Венгрия жартысына жуығын ядролық энергиядан алады. Жапония өзінің электр қуатының төрттен бірінен астамы үшін ядролық энергияға сүйеніп үйренген және бұл деңгейге қайтып оралады деп күтілуде.



2 сурет - 2020 жылға дейінгі кездер бойынша әлемдік электр энергиясын өндіру (Халықаралық энергетика агенттігі)

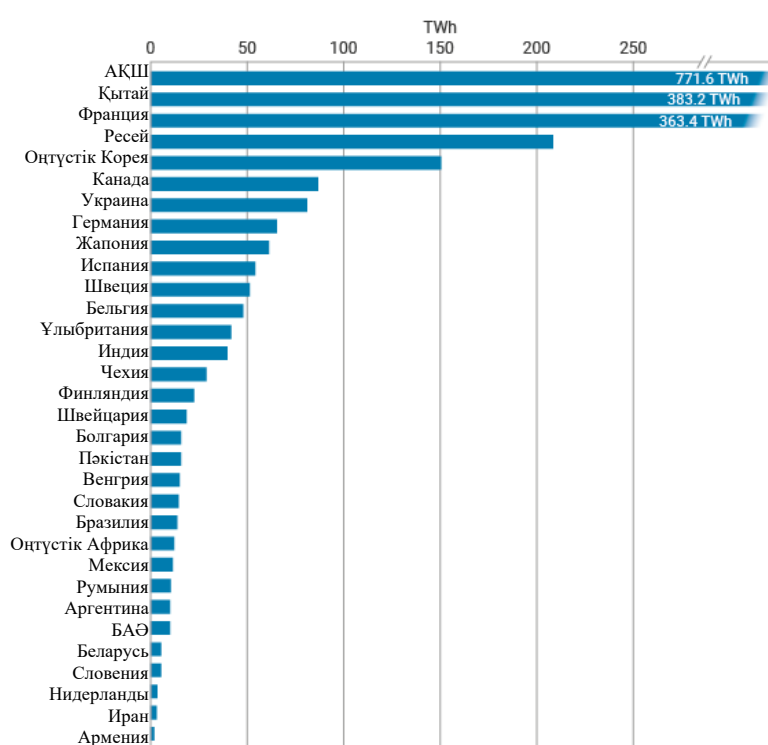
Жапония өзінің электр қуатының төрттен бірінен астамы үшін ядролық энергияға сүйеніп үйренген және бұл деңгейге қайтып оралады деп күтілуде [19].

### Жаңа генерациялайтын қуаттар қажет

Көмірқышқыл газын көп бөлетін ескі қазбалы отын қондырғыларын, әсіресе көмірмен жұмыс істейтін қондырғыларды ауыстыру үшін де, көптеген елдердің электр энергиясына деген сұранысын қанағаттандыру үшін де бүкіл

әлемде жаңа генерациялау қуаттарына қажеттілік анық. 2019 жылы электр энергиясының 63 пайызы қазбалы отынды жағу есебінен өндірілген. Соңғы жылдары үзіліспен жаңартылатын электр энергиясының көздеріне күшті қолдау көрсетіліп, олардың өсуіне қарамастан, соңғы 15 жылда электр энергиясын өндіруге қазба отынының үлесі айтарлықтай өзгерген жоқ (2005 жылы 66,5%).

Халықаралық энергетикалық агенттігі жыл сайын энергетикаға қатысты сценарийлерді жариялайды (3 сурет). Дүниежүзілік энергетикалық болжам 2021 бірінші бағдарламасында басқа мақсаттармен қатар таза және сенімді энергиямен қамтамасыз етуге және ауаның ластануын азайтуға сәйкес келетін өршіл «Тұрақты даму сценарийі» бар. Осы декарбонизация сценарийінде ядролық электр энергиясын өндіру 2050 жылға қарай шамамен 75%-ға 4714 ТВт/сағ-қа дейін артады, ал қуаттылық 669 ГВт дейін өседі.



3 сурет - Елдер бойынша ядролық генерация 2021

Дүние жүзіндегі электр энергиясының төрттен бірін ядролық энергиямен қамтамасыз ету көмірқышқыл газының шығарындыларын айтарлықтай азайтып, ауаның сапасын жақсартады [23].

### 1.4 Ядролық реактор түрлері

Мақсатына қарай реакторлар энергетикалық, зерттеу, көліктік, өндірістік және көпмақсаттық болып жіктеледі. Мақсатына қарай реактордың құрылымдық бейнеленуін, жұмыс режимін анықтайтын талаптарды бірінші орынға қояды. Яғни ол талап материалдарды зерттеуге арналған жоғары ағымды болуы тиіс. Мұнда нейтронды-физикалық қасиеттерді зерттеу үшін белгілі бір энергияда



нейтрондар түйінін анықтау маңызды. Радиактивті изотоптарды өндіру мен теңіз суын тұшытуға арналған өндірістік реакторлар төменгі температурада жұмыс істейді. Энергетикалық реакторларға қойылатын термодинамикалық цикл үнемдігімен және оның көрсеткіштерін жоғарлатуға ұмтылумен анықталады. Екі және көпмақсатты реакторлар, мысалы электр энергиясын өндіретін және теңіз суын тұшытатын екі бағыттың да талаптарын үйлестіруі тиіс.

Нейтрондардың энергетикалық спектрі бойынша жылулық, шапшаң және аралық реакторларды ажыратады. Жақсы игеірілген жылулық нейтронды реакторлар. Олар бөлінетін изотоп бойыша ядролық отынды аз қажет етеді. Нейтрондар энергиясының артуынан жоғары байытылған отын қажет болады, нәтижесінде күштің түсуі төмендеп, энергияның қуаты артады. Бұл қасиеттер өндірістік игеру сатысындағы шапшаң нейтронды реакторларға тән. Бұл реакторлардың даму перспективі ядролық отынды кең ауқымды қолдану мүмкіндігімен анықталады. Аралық нейтронды реакторларды тек арнайы зерттеулерде ғана қолданады.

Барлық коммерциялық қуатты реакторлар ядролық бөлінуге негізделген. Олар әдетте уранды және оның өнімі плутонийді ядролық отын ретінде пайдаланады.

Бөліну тізбегі реакциясын қамтамасыз ететін нейтрондардың энергиясына байланысты бөліну реакторларын екі класқа бөлуге болады:

Жылу-нейтронды реакторлар отынның бөлінуін сақтау үшін баяу немесе термиялық нейтрондарды пайдаланады. Ағымдағы реакторлардың барлығы дерлік осындай түрге жатады. Олардың құрамында нейтрондардың емпературасы термизацияланғанға дейін, яғни олардың кинетикалық энергиясы қоршаған бөлшектердің орташа кинетикалық энергиясына жақындағанша нейтрондарды баяулататын нейтронды модератор материалдары бар. Жылулық нейтрондардың уран-235, плутоний-239 және плутоний-241 бөлінетін ядроларының бөліну ықтималдығы анағұрлым жоғары және нейтрондарды ұстаудың салыстырмалы түрде төмен ықтималдығы бар. Төмен байытылған уранды немесе тіпті табиғи уран отынын пайдалануға мүмкіндік беретін бастапқыда бөліну нәтижесінде пайда болатын жылдамырақ нейтрондармен салыстырғанда уран-238 бойынша модератор сондай-ақ салқындатқыш болып табылады. Олар реактор ыдысымен, реакторды бақылауға және басқаруға арналған аспаптармен, радиациядан қорғаумен және оқшаулау ғимаратымен қоршалған.

Жылдам нейтронды реакторлар отынның бөлінуін тудыру үшін жылдам нейтронды пайдаланады. Оларда нейтрондық модератор жоқ және аз модераторлық салқындатқышты пайдаланады. Тізбекті реакцияны сақтау үшін жанармайдың бөлінетін материалмен жоғарырақ байытылған болуы қажет. Тұтастай алғанда, жылдам реакторлар көптеген қолданбаларда жылу реакторларына қарағанда сирек кездеседі.

Реакторлардың ішінен ең жиі қолданылатыны жылулық нейтронды реакторлар. Жылулық нейтронды реакторлар баяулатқыш түріне қарай мынадай түрге бөлінеді: жеңіл сулы, ауыр сулы және графитті. Графитті реакторларын

беріктік (күштілік) бірлігімен есептегенде мөлшері үлкен. Мөлшері салыстырмалы аз ауыр сулы реакторлар. Бұл баяулатқыштың баяулату қасиетімен баяулату кезіндегі нейтрондар қозғалысына негізделеді. Ең жоғарғы баяулату қасиетіне қарапайым су, ал ең төменгісіне – графит ие. Ал баяулату коэффициентінде бұл реттілікті керісінше пайдаланамыз. Ауыр су ең жоғарғы баяулату коэффициентіне ие. Ауыр сулы реакторларда табиғи уранды пайдаланып, критикалық массасын алуға болады. Жеңіл сулы баяулатқышты қолданғанда тек байытылған уранды пайдаланады, себебі су нейтрондарды баяулатып қана қоймай, оларды сіңіреді. Баяулатқыш ретінде берилийді қолдануға болады. Алайда оның қымбат болуы мен токсикалық әсерінен, оны тек арнайы реакторда және бейнелегіш есебінде қолданады.

Салқындатқыш бойынша реакторлар сулы салқындатқыш, газды салқындатқыш және сұйық металды салқындатқыш болып жіктеледі. Кең таралған салқындатқыш – қарапайым су. Ауыр судың салқындатқыш ретінде базасының қымбаттығынан оларды сирек және баяулатқышы ауыр сулы реакторларда қолданады. Айқын таралған салқындатқыш – газды салқындатқыш. Бұл жоғары температуралы реакторлардағы жалғыз мүмкін болатын – салқындатқыш. Балқытылған металдар шапшаң нейтронды реакторларда пайдаланылады.

Активті орта құрылысына қарай реакторлар гетерогенді және гомогенді болып жіктеледі. Гетерогенді реакторларда отын, баяулатқыш және салқындатқыш кеңістікті бөлінген. Гомогенді реакторларда отын, баяулатқыш және салқындатқыш біркелкі қоспа, ерітінді түрінде болады. Сондықтан мұндай реакторлардың көбейту қасиеті активті аумақтың барлық жерінде бірдей болады. Гетерогенді реакторларда материалдардың біркелкі таралмау салдарынан нейтрондардың біртекті емес кеңістігі болады.

Конструкциялық (құрылымдық) орындалуына қарай реакторлар корпусы және каналды болып бөлінеді. Корпусы реакторларда салқындатқыш қысымын корпус алады, ал каналдыда – әрбір жеке канал. Бұл баяулатқыш пен салқындатқыштың тікелей байланысу мүмкіндігі арқылы анықталады [22].

#### *Отынға байланысты реакторлардың жіктелуі*

Отынға байланысты реакторлардың жіктері әртүрлі: байытылуына (табиғи және байытылған уранды), отынның агрегаттық түріне қарай (табиғи металл уран, легирленген уран, керамикалық отын, балқымалар), өндіріетін материалға (уран-плутонды немесе торий циклды) қарай ажыратылады. Қазіргі ең кең тараған керамикалық отын және уран-плутон циклды реакторлар [26].

#### *Отынның фазасы бойынша:*

- Қатты отынмен жабдықталған
- Жанармай құйылған сұйықтық
- Сулы біртекті реактор
- Балқытылған тұзды реактор

- Газбен жұмыс істейтін (теориялық)

*Өзегінің пішіні бойынша:*

- Текше
- Цилиндрлік
- Сегізбұрышты
- Сфералық
- Тақташа
- Аннулус

*Қолдану бойынша:*

- Электр: атом электр станциялары, соның ішінде шағын модульдік реакторлар;
  - Қозғалыс, ядролық қозғалыс: теңіздің ядролық қозғалысы;
  - Жылудың басқа да қолданылуы: тұщысыздандыру, тұрмыстық және өндірістік жылытуға арналған жылу, сутегі шаруашылығында пайдалану үшін сутегі өндірісі;
  - Элементтерді түрлендіруге арналған өндірістік реакторлар: селекционер реакторлары ыдырау тізбегі реакциясы, түрлі радиоактивті изотоптарды жасау, қару-жарақ плутонийі сияқты ядролық қаруға арналған материалдарды өндіру;
  - Нейтрондық сәулеленә көзін және позитронды сәулеленуді қамтамасыз ету;
  - Зерттеу реакторы: әдетте зерттеу және оқыту, материалдарды сынау немесе медицина мен өнеркәсіп үшін радиоизотоптарды өндіру үшін пайдаланылатын реакторлар. Бұлар қуатты реакторлардан немесе қозғалатын кемелерден әлдеқайда аз және олардың көпшілігі университет қалашығында орналасқан. 56 елде 280-ге жуық осындай реактор жұмыс істейді. Кейбіреулер жоғары байытылған уран отынымен жұмыс істейді, ал төмен байытылған отынды алмастыру үшін халықаралық жұмыстар жүргізілуде [25].

*Атом энергиясы жөніндегі халықаралық агенттік классификациясы*

Атом энергиясы жөніндегі халықаралық агенттік - БҰҰ-ның 1954 жылғы 4 желтоқсандағы шешіміне сәйкес құрылған халықаралық ұйым, БҰҰ жүйесінің бөлігі болып табылады, ынтымақтастықты дамыту жөніндегі өкілеттіктерді жүзеге асырады, атом энергиясын бейбіт мақсатта пайдалану саласы. 1957 жылы құрылған.

- Атом энергиясы жөніндегі халықаралық агенттік ядролық энергетикалық реакторлардың негізгі түрлерінің оларда қолданатын салқындатқыш және модератор материалдарына сәйкес келесі классификациясын пайдаланады:

- PWR (қысымдағы су реакторы) - қысымды су реакторы, онда жеңіл су салқындатқыш және модератор болып табылады;

- BWR (қайнаған су реакторы) - қайнаған су реакторы, онда PWR-ден айырмашылығы, турбиналарға берілетін будың түзілуі тікелей реакторда жүреді;
- FBR (fast breeder reactor) - модераторды қажет етпейтін жылдам реактор;
- GCR (газбен салқындатылған реактор) - газбен салқындатылған реактор. Модератор ретінде әдетте графит қолданылады;
- LWGR (жеңіл су графит реакторы) - графит-су реакторы;
- PHWR (қысымдағы ауыр су реакторы) - ауыр су реакторы;
- HTGR (жоғары температуралы газбен салқындатылған) – жоғары температуралы газбен салқындатылған реактор;
- HWGCR (ауыр суды реттейтін, газбен салқындатылған реактор) – ауыр суды реттегіші бар газбен салқындатылған реактор;
- HWLWR (ауыр суды *реттейтін*, қайнаған жеңіл сумен салқындатылған реактор) – ауыр суды реттегіші бар қайнаған су реакторы;
- SGHWR (бу шығаратын ауыр су реакторы) – қайнап жатқан ауыр су реакторы [21].

### *Жеңіл сулы реакторлар*

Ядролық реакторлар бағыты мен басқа да қасиеттеріне қарай ажыратылады. Ядролық энергетикалық реактордағы ең негізгі компонент баяулатқыш пен салқындатқыштың үйлесімділік мүмкіндігі. 1 кестеде «+» белгісімен үйлесімділік көрсетілген.

1 Кесте - Ядролық реактордағы баяулатқыш пен салқындатқыш үйлесімділігі

Реактор типі	Баяулатқыш	Салқындатқыш			
		H <sub>2</sub> O	газ	D <sub>2</sub> O	Сұйық металл
Жеңіл сулы	H <sub>2</sub> O	+	-	-	-
Графитті	Графит	+	+	-	-
Ауыр сулы	D <sub>2</sub> O	+	+	+	-
Шапшаң нейтронды	жоқ	-	+	-	+

Көрініп тұрғандай жеңіл сулы реакторларда салқындатқыш ретінде тек қарапайым суды қолдану қажет. Басқа салқындатқыштарды энергетикалық реакторда қолдану тиімсіз болып келеді. Газды салқындатқыш жағынан төмен, оны қолдану реактордың активті ортасының құрылымы мен компоненттерін күрделендіреді. Ауыр суды қарапайым сумен салыстырғанда бағасы қымбат болып келеді. Сұйық металдардан практика жүзінде салқындатқыш ретінде тек балқытылған натрий қолданылады. Оның сулы баяулатқышпен үйлесімділігі

жоқ болып келеді. Осы жеңіл сулы реакторларда баяулатқыш пен салқындатқыш міндетін су атқарады. Бұл корпус типті жылулық нейтрондарды қайнаған және қысым сулы жеңіл сулы реакторлар.

Ядролық энергетикада жеңіл сулы реакторларды қолдану басымдығы бірнеше себептермен түсіндіріледі. Су - ядролық реакторларда баяулатқыш пен салқындатқышқа сай келетін материал. Сонымен қатар суды табу оңай, ертеден бері техниканың көптеген салаларында қолданылып келеді, сондықтан да оның қасиеттері жақсы зерттелген. Баяулатқыш ретінде су жоғарғы баяулату қасиетіне ие, нәтижесінде көлем бірлікті жоғарғы күш алуға болады. Бір мезгілде суды баяулатқыш және салқындатқыш ретінде қолдану қарапайым реакторлар жасауға мүмкіндік береді. Жеңіл сулы реакторлар реактивтіліктің теріс температуралақ коэффициенті арқасында жоғарғы төзімділігімен ерекшеленеді. Судың активтілігі қысқа өмір сүретін нуклидтерге негізделген. Ол бірінші контурдағы қондырғыға жету мен биологиялық қорғанысты жеңілдетеді. Салқындатқыш ретінде су жылуды жақсы жүргізеді.

Судың көрсетілген артықшылығына қармастан оларды ядролық реакторларда қолдану біршама қиындық туғызады. Су нейтрондарды қарқынды сіңірумен қатар, активті ортадағы нейтрондарға кері әсер етеді, сондықтан да байытылған уранды қолдануды қажет етеді. Нәтижесінде жеңіл сулы реакторлардағы өндіру коэффициенті жоғары емес болады. Суда нейтрондардың күшті баяулауы энергия бөлінудің бірінші таралмауына әкеп соқтырады. Сондықтан жеңіл сулы реакторды құрастырғанда активті ортада судың біркелкі таралуын бақылау қажет. Судың құрылымдық материалдарды тот бастыратын қасиеті эксплуатациялық шығынды көбейтеді. Тиімді температураны алу үшін жоғарғы қысым қажет. Температура деңгейінің шектелуімен жеңіл сулы реакторларға бу цикл тән. Сулы салқындатқышты қолданғанда бөліктік жылу ағыны тығырықтың жылу күшімен шектеледі. Дәл осы жағдайлардың барлығын жеңіл сулы реакторларда ескеру қажет.

Сулы салқындатқышты қолдану қысым астындағы сулы және қайнайтын сулы реакторларды құрауға мүмкіндік береді. Бұл реакторлардың жылу-физикалық және құрылымдық ерекшеліктерін және олардың даму перспективасын ретімен қарастыра аламыз.

Активті ортада су қайнамайтын энергетикалық жеңіл сулы реакторлар әлемде және біздің ішімізде қолданылатын басқа реакторлар типіне қарағанда басымырақ. ТМД елдеріндегі ядролық энергетика жеңіл сулы энергетикалық реакторлар типті реакторларға негізделген. Реактордың осы типі PWR – Pressure Water Reactor атом энергетикасында АҚШ, Франция, Германия және басқа да елдерде пайдаланылады. Ядролық энергияны пайдаланудың ерте сатысындағы бұл типтегі реакторлардың шағындығы оларды тасымалды жағдайда қолдануға мүмкіндік берді [18].

## *BWR- реакторы*

BWR- реакторының корпусішілік қондырғылары мен активті ортасы тегіс алмалы қақпақпен жабдықталған биік, тығыз металл корпуста орналасқан. Активті орта салқындатқыштың қайнау мен су айналымы нәтижесінде корпус ішінде корпусішілік қондырғылардың орналасуының өзіндік спецификасы бар. Салқындатқыш айналымы контурдың көтеретін және төмен түсірілетін бөлігіндегі сұйық көрсеткіші массасының әртүрлілігімен жүзеге асады. Активті ортаға кіргенде салқындатқыш қанығу температурасына дейін біршама жетпейді, сондықтан кейбір бөліктерде ол ысып қайнауға дейін жетеді және бу генерациясы басталады. Активті ортадан шығарда бу сулы қоспа қозғалады, ол ілмелі шахтаның жоғарғы бөлігіне көтеріледі, онда табиғи гравитация нәтижесінде су мен будың бөлінуі жүзеге асады. Бөлім деңгейі ауыспалы терезе деңгейінен біршама жоғары болады. Су ауыспалы терезе арқылы төмен түсетін бөлікке түсіп, қайтадан қоректік сумен араласалды, осылайша контур оқшауланады. Қаныққан бу жоғарғы тізбегінен құбырға өтеді.

Біріншілік сызбадағы реактордағы судың бір бөлігі қоректік су деңгейінде орналасқан бу генераторларына екіншілік бу алу үшін алынады. Осылайша тәжірибе жинақтау мақсатында екі контурлы, бірконтурлы және аралық сызбаларының жұмыс жасау мүмкіндігін қарастырды. Нәтижесінде бу генераторлары құбырға келіп түсетін бу активтілігінің ешқандай пайдасы жоқ екендігі анықталды, станция толығымен бір контурлы жүйеге ауыстырылып, бу генераторлары алынып тасталады.

BWR- реакторының реттелуі мен артық реактивтілікті компенсациялау реакторындағы жинаққа ұқсас сіңіруші қозғалмалы жинақ тор арқылы жүзеге асады.

BWR-жұмысы бұл реакторлардан төзімді, берік, өзіндік реттелуі бар екендігін көрсетті. Әсіресе оларды атом жылу электр орталықтарында (АЖЭО) қолдану тиімді.

Әлемдік тәжірибеде қайнайтын жеңіл сулы реакторлар (BWR) айтарлықтай дамыды. АҚШ-та АЭС-тің 2/3 PWR реакторымен жұмыс жасайды, ал 1/3 BWR. Қазіргі таңда BWR типті реакторлардың бірлік күші 1300 МВт жетті. Оған келесі факторлар арқылы қол жеткізеді. Судан табиғи айналамының орнына жасанды айналымды қолдану айналым қысқалығы мен жылдамдығын арттырады. Гравитациялық сепарация вертикальды турбосепараторларды қолдану арқылы жасандыға ауыстырылады. Бұл реактор корпусының көлденең қимасы ауданында бірлікпен есептегендегі бу күшін арттыруға мүмкіндік береді. Активті орта көлемі үлкейтіледі.

BWR типті күшті реакторлар типті 6-7 м қалың қабырғалы корпуста дайындалады және дайындау зауытынан АЭС монтажды алаңына сулы жолмен тасымалданады. Корпус қабырғасының қалыңдығы PWR реакторларындағымен бірдей, себебі BWR корпусындағы қиын 2 есе кіші.

BWR реакторының активті ортасының негізгі құрылымдық материалы – цирконий балқымасы. Жинақта жинақталған стерженді пайдаланылады. Шет ел

тәжірибесінде қайнайтын және қайнамайтын реакторлардағы ЖШЖ пішіні – шаршы. Отын ретінде уран диоксиді қолданылады. Реттеу жылжымалы крест пішінді сіңіруші стержендер арқылы жүзеге асады. ВWR типті реакторларда РС приводтары төменде орналасады. Ол мынаған негізделген: біріншіден, реактордың жоғарғы бөлігінде циклонды сепарациялық қондырғылар орналасқан және келтіргішті орналастыру үшін онда орын жоқ. Екіншіден, РС келтіргіштерінің бұл бөлікте орналасуы судың қайнауынан активті ортаның төменгі жағына ығысқан энергия бөлінудің таралуын біркелкі етуге мүмкіндік береді. Кемшілігі – реактор астында орналасқан келтіргіштер бөлігіне жету қиындығы [19].

### *Ауыр сулы реакторлар*

Ауыр сулы реакторлар деп баяулатқыш болып ауыр су табылатын реакторларды айтады. Олар ядролық есебінен экономикалық тиімді, ол ауыр судың ( $D_2O$ ) баяулатқыш ретіндегі қызметіне негізделген: ауыр су қарапайым су және графитпен салыстырғанда жоғарғы баяулатқыштық коэффициентке ие. Бұл реакторларда бірлік қуат өндіру үшін отынды минимальды салуды қажет етеді. Ауыр су жылулық нейтрондарды сіңірмейді, сондықтан ауыр сулы реакторлар табиғи уранды отында жұмыс жасай алады. Бұл реакторларда басқа жылулық нейтрондарды реакторлармен салыстырғанда ӨК нейтрондар балансы жақсы.

Ауыр сулы реакторлардың негізгі кемшілігі – ауыр судың қымбаттылығы. Алайда, ол толығымен отын арзандылығымен компенсацияланады. Алайда, ауыр сулы реакторларды құрастырғанда және жұмыс барысында  $D_2O$ -ның минимальды шығыны болуына назар аудару қажет. Егер ауыр су шықса, жұмыс бөлімінде адам организміне зиянды және токсикалық тритий бөлінеді.

Ауыр сулы баяулатқыштағы нейтрондар жолы қарапайым сумен салыстырғанда ( $H_2O$ ) төмен, сондықтан ауыр сулы реакторлардың активті ортасының торы сирек болып жасалады. Өлшемдері бойынша ауыр сулы реакторлар графитті реакторға ұқсас және олардың активті ортасындағы энергия бөлінуі төмен.

Ауыр сулы реакторларда салқындатқыш ретінде ауыр және қарапайым су кеңінен қолданылады. Салқындатқыш ретінде ауыр суды қолданғанда реакторлар корпусты және каналды бола алады. Алайда, негізгі ағу циркуляциялық контурда болғандықтан сирек торлы баяулатқышты салқындатқыштан ажырату керек, мұндай жағдайда реактор канал типті болады. Жеңіл сулы салқындатқышты реакторларда активті орта құрылымы салқындатқыш пен баяулатқыш арасында ешбір байланыс болмайтындай етіп жасалады.

Сулы салқындатқышты ( $D_2O$  немесе  $H_2O$ ) ауыр сулы реакторлардың активті ортасында су қайнайтын және қайнамайтын болады. Бұл реакторларда салқындатқыштың жылу физикалық қасиетіне негізделген қысым жоғарылығы тән болады.

Ауыр сулы реакторларда салқындатқыш ретінде газды қолдануға болады. Кейбір елдерде газды салқындатқышты энергетикалық ауыр сулы бірнеше реакторлар бар. Бұл – корпус типті реакторлар.

Ауыр сулы реакторлар басқа типті реакторлармен салыстырғанда аз дамыған. Бұл олардың қуаттылығының қымбаттылығымен, құрылымдық нұсқаларының көптігімен анықталады. Алайда, кейбір елдерде Канада атом энергетикасының дамуы ауыр сулы реакторларға негізделген. Канаданың атом энергетикасында табиғи уранды, ауыр сулы баяулатқыш пен салқындатқышты бір типті CANDU (Canada Deuterium Uranium) атауына ие болған реакторлар қолданылады.

CANDU типті реакторының ерекшелігі канал типті, реактор жұмысы барысында жұмыс каналдары мен ядролық отын салу горизонтальды орналасады. 1962 ж осы типті, қуаты 22 МВт тәжірибе-өндірістік реактор іске қосылды. Нәтижесінде игеру деңгейі мен модернизациялануына қарай қуаты 500, 600 және 750 МВт болатын реакторлар жұмысы басталды.

Ауыр сулы реакторлардың каналындағы баяулатқыш температурасы  $70^{\circ}\text{C}$  деңгейінде болады. Бұл  $\text{D}_2\text{O}$  бағінде төменгі қысымды ұстап тұруға мүмкіндік береді. Сондықтан әдетте нейтрондарды әлсіз сіңіретін алюминий балқымасынан жасалатын каландр түтігі қабырғасы салыстырмалы жұқа болады. Ауыр сулы реакторларда баяулатқыш температурасын төменгі деңгейде ұстап тұратындықтан жылу нейтрондарының әлсіз спектрі түзіледі. Алайда, ауыр су температурсын  $70^{\circ}\text{C}$ -да ұстап тұру үшін одан үнемі жылу шығару қажет, жылу  $\text{D}_2\text{O}$ -ның нейтрондары мен кванттарының өзара әсерлесуінен пайда болады және реактордың толық жылулық қуатының 6% құрайды. Сонымен қатар ыстық салқындатқыштан жұмыс каналына салқын баяулатқышқа жылудың ағатын жері бар. Бұл ағуды минимумға жеткізу үшін салқындатқыш қысымын алып жүретін жұмыс каналдары газ немесе изоляциялық материалмен толтырылатын шелі бар каландар құбырына орналастырылады. Әдетте, күшті термиялық қарсылас тудыратын газ қолданылады. Бөлінген жылуды жинақтау үшін автономды салқындататын жылу алмастырғыш пен насосты контур қарастырылған. Онда  $\text{D}_2\text{O}$  циркуляцияланады. Бұл жылу төмен потенциалды және қолданылмайды, бұл тікелей шығын болып табылады.

CANDU реакторында отын ретінде құрамында  $\text{U}^{235}$  бөлінетін изотопы бар уран диоксиді  $\text{UO}_2$  пайдаланылады. Ол циркалойді қабықты стерженді жиынтығынан тұрады. Активті ортадағы жұмыс каналының құбыры цирколайдан, ал торц бөліктері тот баспайтын болаттан жасалған. Активті ортаның негізгі құрылымдық материалы жеңіл сулы реакторындағыдай цирконий балқымасы. Ол жоғарғы ӨК мен жақсы нейтрондар балансын алуға мүмкіндік береді.

Отынды салу жұмыс барысында ЖШЖ-ты бір торцтен келесіне итеру арқылы жүргізіледі. Ол үшін қорғаныс тығынды алатын торцтарға қарама қарсы орналасқан екі машина бар. Одан кейін ЖШЖ-ты каналға жіберіп, оны ЖШЖ ұзындығына итереді, ал екіншіні каландр торцының қарама қарсы жағынан жұмысын аяқтаған ЖШЖ-ты қабылдап алады. Бұдан кейін канал

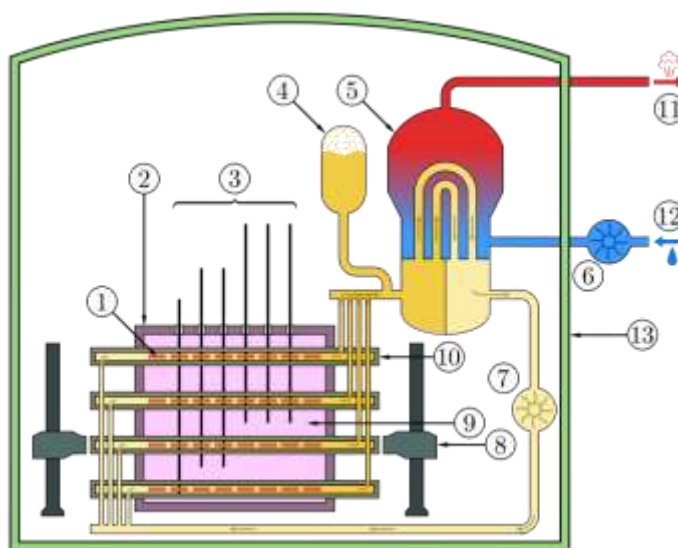


герменизациясы кері ретпен жүреді, ал машина келесі каналмен жанасады. Бұл реакторда отынды салу жұмыс барысында ЖШЖ-ты ығыстыру арқылы жүргізіледі.

Отын салудың мұндай түрінде критикалық массада артық отын температуралық және қуаттық эффект, ксенонмен улау арқылы анықталады. Нәтижесінде компенсациялаушы заттарды минимум қажет етеді. Ауыр сулы реакторларда реактивтілікті әртүрлі жолмен компенсациялауға болады: вертикальды каналдарда орналасқан жылжымалы сіңіруші стержендер, каландр бакіндегі ауыр су деңгейімен, қарапайым сумен толтырылатын сұйықтықты стержендер, сіңіруші нейтрондар. Жіңішке реттеу әдетте жылжымалы сіңіруші стержендер арқылы жүргізіледі. Жылдам апаттық өшіру үшін реактивтілікті реттейтін компенсациялайтын барлық құралдар қолданылады [14].

### *CANDU реакторы*

Канадада қуаты 600 және 1200 МВт блоктар негізінде CANDU реакторларын жетілдіру және стандарттау жұмыстары жүргізілуде. Салқындатқыш температурасы мен қысымын арттыруға мүмкіндік беретін жаңа цирконийлі қабықшалар жасалуда. Барлық технологиялық каналдарды қайнау режиміне ауыстыру мүмкіндігі қарастырылуда.



4 сурет - «CANDU» АЭС реакторының жалпы көрінісі.

1 – ядролық отын; 2 – каландр түтігі; 3 – РС; 4 – қысым генераторы; 5 – бу генераторы; 6 – жеңіл су насос; 7 – ауыр су насосы; 8 – отын алмастырғыш; 9 – ауыр су; 10 – қысым түтікшесі; 11 – бу; 12 – су конденсаторы; 13 – реактор корпусы

CANDU реакторымен қатар бірқатар мемлекетте оның ішінде де Канадада да қарапайым сумен салқындатытын ауыр сулы реакторлар игерілуде.

Отын ретінде құрамында табиғи  $U^{235}$  бар уран диоксиді қолданылады. Негізгі құрылымдық материал цирконий негізіндегі балқыма. Отынды салу жұмысын реактор жұмысы тоқтағанда және жұмыс барысында жүргізуге болады. Артық реактивтілікті реттеу және компенсациялау ауыр сулы реакторларда қолданылған құралдар арқылы жүзеге асады [13].

### *Графитті баяулатқышты реакторлар*

Графитті реакторлардың активті ортасында отын, баяулатқыш және салқындатқыш орналасқан. Графитті реакторларда әртүрлі салқындатқышты қолдану мүмкіндігі бар, олардың ішінде қарапайым су мен газ кең қолданыс тапты. Жеңіл сулы реакторларға қарағанда бұл реакторлардың көлемі үлкен, бұл баяулатқыш ретіндегі графит қасиетіне байланысты. Графиттің баяулатқыштық қасиеті сумен салыстырғанда төмен, сондықтан жылулық нейтрондардың спектрін алу үшін активті ортадағы графит мөлшері айтарлықтай көп. Графит уранды қатынас су уранды қатынасқа қарағанда он есе артық. Соның арқасында графитті реакторлардағы активті ортадағы бөліктік энергия бөліну аз.

Графитті баяулатқыштың артықшылығы – нейтрондарды өте баяу сіңіру қасиеті. Сондықтан бұл реакторларда активті ортаның құрылымдық материалы мен негізгі компоненттерінің сәйкестігінде нейтрондар балансын алуға болады және отын ретінде табиғи уран қолданылады, онда  $\beta_K$  0,8-ге дейін жетеді. Графит табиғатта кең тараған, қол жетімді материал, оның өндірілуі жеткілікті игерілген, химиялық тұрақты, жылу өткізгіштік қасиеті жоғары, жоғары жұмыс температурасына төзімді. Сирек тор мен параллельді каналдар санының көптігінен отын салуды реактор жұмысын тоқтатпай-ақ жүзеге асыруға болады. Жұмыс барысында параллельді каналдардан бір ЖШЖ алу реактор реактивтілігіне ешқандай әсер етпейді. Мұнда ешқандай ығыстырғыштардың қажеті жоқ.

Графитті реакторларды құру барысында графитті салу ядролық реактордың барлық жұмысына шектелуі түседі. Графиттің сәулелену мен температураның өзгеруінен өз қасиетін ескеру қажет. Бұл әдетте жылу өткізгіштік пен көлемнің өзгеруінде байқалады. Сонымен қатар, графит анизотропиясын ұмытпау тиіс. Реакторлар жұмысы графиттің ұзақ уақыт сенімді қызмет атқаратынын және графит қасиеттерінің өзгеруінен апаттық жағдай кездесетінін көрсетті. Графит көптеген материалдармен үйлеседі, оның ішінде ядролық отын да бар. Қолданылатын салқындатқышқа байланысты графитті реакторлардың құрылымы мен жылу-физикалық қасиеттері бойынша ерекшеліктері болады [11].

### *Сулы салқындатқышты графитті реакторлар*

Сулы жыутасымалдағышты графитті реакторлардан кеңес одағының атом энергетикасы дамыды. 1954 ж. қолданысқа енгізілген АЭС-да қуаттылығы 5 МВт, сулы салқындатқышты графитті реактор орналастырылған. Бұл реактор

каналды типті, активті ортасы жеңіл металл корпуста орналастырылған графитті өрім тәрізді. Графитті өрменің вертикальды беткейінде технологиялық каналдар орналасқан, оның құрамына ядролық отын және салқындатқышты айдайтын түтікшелер жүйесі кіреді. Реактор активті ортада судың қайнамауына есептелген. Су 10 МПа қысымнан реакторда 280<sup>0</sup>С температураға дейін қызады және екінші бу генерацияланатын бу генераторына бағытталады. Технологиялық каналдардың негізгі құрылымдық материалы – тот баспайтын болат. Отын ретінде 5%-ға дейін байытылған уран пайдаланылады.

Отынды салуды реакторды өшірген кезде жүргізеді. Ол үшін жоғарғы жабылған бөлікті толығымен немесе жартылай алып тастайды. Бұл каналдардың жоғарғы жағына жетуге мүмкіндік береді. Салғыш машина көмегімен каналдар келетін және шығатын коммуникациядан ажыратылады, активті ортадан алынып, ұзақ сақтағышқа тасымалданады. Алынғандар орнына жаңаларын салады.

Реактордың реттелуі графитті өрменің вертикальды каналдарында орналасқан жылжымалы РС арқылы жүзеге асырылады. Реакторда жалпы 100 сіңіруші стержень бар, оның ішінде 6 автоматты реттеуге, 78 компенсациялауға және 16 апаттық жағдайға арналған. Компенсациялайтын және реттейтін стержендер келтіргіштері реактордың төменгі ұшында орналасқан, себебі жоғарғы ұшында салқындатқыштың алып келгіш және алып кеткіштері бар. Жоғарғы жағында тек апаттық қорғау стержендерінің электромагнитті келтіргіштері орналасқан.

Артық реактивтілік компенсациясы реттелуі және апаттық қорғанысы бор карбидінен жасалған жылжымалы сіңіруші стержендер арқылы жүзеге асады. Сіңіруші стержендерге арналған 195 канал бар. РС келтіргіші ретінде РС стержендер каналдарының жоғарғы жағына орналасқан асинхронды қозғалтқыштар атқарады [11].

### *Газды салқындатқышты графитті реакторлар*

Газграфитті реакторларда салқындатқыш ретінде газ пайдаланылады. Газ аса жоғары температураға дейін графитпен әсерлеспейді, сондықтан мұндай реакторларда корпусты нұсқа пайдаланылады. Газды салқындатқыш пен графитті баяулатқыштың белгілі жағдайда үйлесімділігі ядролық отын ретінде табиғи уранды пайдалануға мүмкіндік береді. Газ, графит тәрізді жоғарғы қызуды өткізеді, сондықтан газграфитті реакторлар температурасы жоғары болуы мүмкін. Газды салқындатқыш артықшылығы тот басу қабілеті әлсіз, ол қарапайым көміртекті болатты қолдануға мүмкіндік береді және биологиялық қорғанысты қажет етпейді.

Газды жылу тасымалдағыштың негізгі кемшілігі – оның баяу жылу өткізгіштігі, осыған сәйкес жылу берудің коэффициенті төмен. Бұл екі қасиет газ тығыздығына пропорционал және оларды жақсарту үшін айналым контурының қысымын арттыру қажет. Жылу беру коэффициентін жоғарлату үшін салқындатқыш айналымы жылдамыдығын арттырады, кейбір реакторлар

типінде қабырғалас жбэл-тер қолданылады. Бұның барлығы қорыта келгенде салқындатқышты айдау үшін жылу көбейеді. Олардың ерекшелігі газды контур құбыржолдары көлемінің үлкендігі, бұл салқындатқыштың аз жылу сыйымдылығына негізделген.

Газграфитті реакторлардың одан әрі дамуынан AGR (Advanced Gas-cooling Reactor) реакторлар жасалды. Табиғи металл уранның орнына 2,5%-ға байытылған  $U^{235}$  пайдаланылады, жбэл-дің магнийлі қабығы тот баспайтын болатпен ауыстырылған. Бұл жану тереңдігін 20000 МВт·тәу/кг ал шығардағы газ температурасын 650-670<sup>0</sup>С-ге дейін арттыруға мүмкіндік берді. Бірінші рет AGR реакторлары магнийлі реакторлар тәрізді металл корпуста жасалған, одан кейін темірбетоннан жасала бастады. Реактордың бірлік қуаты 660 МВт-қа жоғарылады [10].

### *Шапшаң нейтронды реакторлар*

Шапшаң нейтронды реакторларда ядролық отынды өндіру кең ауқымды. Бұл олардағы  $\Theta K$  бірден көп болумен негізделеді.  $\Theta K$  есепке ала отырып, ядролық отынның жинақталуын былайша есептеуге болады:

$$M = M_0 \Theta K + M_0 |\Theta K|^2 \quad (1.1)$$

мұндағы  $M_0$  – ядролық отынның жұмсалатын қоры.  $\Theta K < 1$  болғанда, жылулық нейтронды реакторларда мынадай көрініс табады:

$$M = M_0 / (1 - \Theta K) \quad (1.2)$$

бұдан егер  $\Theta K = 0,5 \div 0,7$  болғанда, қорды 2-3 есеге арттыруға болатынын көреміз. Егер  $\Theta K$  бірден айтарлықтай көп болса, (5.1) теңдеуден байқалғандай ядролық отын салыстырмалы жылдам жинақталады, ол  $U^{238}$  және  $Th^{232}$  барлық қорын пайдалануға мүмкіндік береді. Бұл табиғи уранды қымбат бағамен алуға алып келеді, оған деген сұраныс төмендейді, нәтижесінде ядролық отын ресурсы кеңейеді.

Нейтрондар генерациясы (шапшаң нейтрондарда  $U^{238}$  бөліну генерациясы) және (бір бөлінуге есептелген екіншілік нейтрондар саны) коэффициентімен анықталады, ол  $1 + \alpha$ , мұндағы  $\alpha = \sigma_c / \sigma_f$  жатқызылады.

$\mu$  коэффициенті шапшаң нейтронды реакторға қарағанда жылулық нейтронды реакторда аз, себебі  $U^{238}$  жылулық реакторындағы өзара байланысы тек энергиясы  $E \geq 1$  МэВ баяулатқыш нейтрондармен болады, ал шапшаңда нейтрондар саны көп және өндіруші материалдың бөліну ықтималдығы артады.

$Pu^{239}$ -жылу айналымдағы бір бөлінудегі екіншілік нейтрондар саны  $\nu_{ж}^{Pu} = 2,87$ , ал шапшаңда  $\nu_{ш}^{Pu} \approx 3$ , ал коэффициент сәйкесінше 0,39 және 0,1-ге тең. Сондықтан бөлінуші нуклеид ретінде  $Pu^{239}$  қолданғанда шапшаң реакторлардағы нейтрондар генерациясы жылулықпен салыстырғанда көп. Жылулық аумақта нейтрондар генерациясы 2, ал шапшаңда 3-ке тең.

Нейтрондарды жоғалту жылулық және шапшаң реакторларда бірдей. Осылайша жылулық нейтронды реакторда  $\Theta K > 1$ .

Бөлінуші нуклид ретінде  $U^{235}$  қолданғанда жылу аумағында нейтрондар генерациясы шамамен 2-ге тең, алайда шапшаңда ол төмен  $3 Pu^{239}$  қарағанда коэффициент төмен  $\eta = \nu / (1 + \alpha)$ . Сондықтан шапшаң нейтронды реакторларда  $Pu - U$  циклы тиімді. Мұнда  $\Theta K \approx 1,5$  бола алады.

$U^{235}$ -ды отын ретінде қолданғанда  $\Theta K \geq 1$  болады. Сондықтан шапшаң нейтронды реакторларды іске қосу үшін плутоний қоры жеткілікті болуы тиіс. Плутоний ролін реактор – конвертерлер атқара алады. Оларға ауыр сулы реакторлар мен  $\Theta K \geq 0,8$  жылулық нейтронды реакторларда жатқызуға болады.

Конвертер ретінде торий циклы жылулық нейтронды реакторларды қолдану тиімді.  $U^{233}$  бөлінетін нуклидті қолданғанда нейтрондар генерациясы  $\sim 2,3$ -ті құрайды, бұл  $U^{235}$  мен  $Pu^{239}$  қолдануға қарағанда  $\eta$  коэффициентінің жоғарлағыштығымен анықталады. Мұнда  $\Theta K$  бірге жақындайды немесе асады.

Жүргізілген анализ бойынша шапшаң нейтронды реакторларда ғана  $\Theta K$  бірден жоғары болады, спектр қатаң болған сайын  $\Theta K$  жоғарылайды. Сондықтан шапшаң нейтронды реакторларда баяулатқыш пен нейтрондарды сөйлететін материалдар болмауы қажет. Оларға жеңіл ядролы материалдар жатады. Ауыр ядролардың болуы да нейтрондар спектрінің жұмсаруына алып келеді. Активті ортаға шикізатты материалды ( $U^{238}$ ) мүмкіндігінше орналастырмау қажет. Сондықтан бөлінетін нуклидтерді салу байытылған отыннан тұруы қажет.

Осы себептерге байланысты құрылымдық материал ретінде массалық саны орташа материалдар алынады. Оларға осы реакторларда негізгі ауырлық материал ретінде қолданылатын болат жатады. Мұнда құрылымдық материалдарды нейтрондарды сіңіру мүмкіндігіне қарай таңдау ауқымды, себебі барлық материалдарды жоғарғы энергия аумағындағы ұстау қиылысуы бірдей және жылулық аймаққа қарағанда айтарлықтай төмен. Мұнда құрылымдық материалдар мен ядролық отын изотоптарының сіңіру қиылысында ауытқулы өзгерістер жоқ. Бұл энергия бөлінудің таралуына жағымды әсер етеді: шапшаң реакторларда нейтрондар таралуының локальды сәйкес келмеуі байқалмайды, ал жылулық нейтронды реакторларда көрінеді. Айтылғанды түсіндіру үшін жылулық аймақта  $(\sigma_5/\sigma_8)_ж \approx 200$ , ал шапшаңда  $(\sigma_5/\sigma_8)_ш \approx 20$  тең болатын  $U^{235}$  және  $U^{238}$  сіңіру қиылысын салыстырайық. Көрініп тұрғандай ол реттілікпен ерекшеленеді. Бұл бөлінетін нуклидті отынды критикалық салуды анықтайтындықтан маңызды мағынаға ие. Жүргізілген есептеулер оның жылулық реакторларға қарағанда шапшаң реакторларда көп болатынын көрсетті. Олар бөлінетін нуклидті байытылған отынмен салынады. Өндіруші материалдың ( $U^{238}$ ) негізгі бөлігі активті ортаны жан-жағынан қоршайтын өндіріс аумағында орналасқан.

Осылайша шапшаң нейтронды реакторлардың активті ортасы жоғары байытылған ядролық отынды, ол өндіріс аумағында табиғи немесе құрама уран орналасқан. Жоғары байытылған отынды пайдаланғандықтан активті орта шағын, аумақ шағын, жылулық нейтронды реакторларға қарағанда энергия қуаты 3-5 есе жоғары.

Активті ортаның қатаң нейтрондар спектрі және энергия бөлінудің жоғары болуынан салқындатқыш талаптары анықталады. Ол жылуды қарқынды беріп және нейтрондарды әлсіз сейілдіру қажет. Бұл тұрғыдан ең тиімдісі сұйық металдар, соңғы уақытта газды салқындатқышты қолдану мүмкіндігі қарастырылуда. Жоғарғы баяулатқыш қасиетіне ие сулы салқындатқыш шапшаң нейтронды реакторларда қолданылмайды.

Сәулеленген отынды ұстау радиактивтілік деңгейін төмендету үшін қажет. Ұстау көп болған сайын, сәулеленген отынның регенерация процесі соғұрлым қауіпсіз. Уақытты қысқарту үшін түйінге оптимум іздейді. Жбэл-тер өндірісі дайындау технологиясының жетілдіруімен, стандарттау деңгейімен, өндіріс масштабымен анықталады. Отынның реактордағы уақыты екіншілік ядролық отынның жинақталу жиілігімен анықталады. Жинақталу жиілігі активті ортаның энергия қуатына байланысты, ол байытылған отын қолданылатын шапшаң нейтронды реакторларда жоғары.

Кеңейтілген өндірісті циклде ядролық атомның жинақталуы келесі қатынастан анықтауға болады:

$$M/M_0 = \exp(\omega, t), \quad (1.3)$$

мұнда  $\omega$  – жинақталу жиілігі,  $t$  – уақыт,  $M_0$  – қалған отынды салу,  $M$  – уақыт ішінде жинақталған отын көлемі.

Онда екі еселену уақыты:

$$t_2 = (\ln 2) / \omega \quad (1.4)$$

Ядролық отынның қажетті жинақталу жиілігін энергетикалық қуатты өсіру қажеттілігімен бағалауға болады. Егер көлемін ~5%-ға тең электр энергиясын өндірудің жылдық орташа жоғарлауымен сәйкестендірсе, онда екі еселену уақыты  $t_2 \approx 14$  жыл, бұл шапшаң нейтронды реакторларды орнату бағасына сай. Алайда дамып келе жатқан ядролық энергетикада екі еселену уақыты екі есеге кемітілуі тиіс.

Реакторда екіншілік ядролық отынның жинақтау жиілігін арттыру үшін ӨК жоғарлату және отын салуға жұмсалатын уақытты қысқарту қажет. Ал бұл шапшаң нейтронды реакторларда отынның жаеу тереңдігін арттыруды қажет етеді. Бөліну өнімдерінің жинақталуынан реактивтілікті компенсациялау тұрғысынан ешқандай қиындық туғызбайды. Себебі шапшаң нейтрондардың баяу сіңірілуі реактивтілікке әсер етпейді. Мәселен, терең жануға төзімді берік жбэл-ді дайындауды. Шапшаң нейтрондарды күшті сіңіретін материалдың жоқтығынан, реактивтілікті реттеу мен компенсациялау мәселесі туындайды. Ол активті орта шағын болғандықтан реттеу органдарын орналастыратын орын жоқтығымен күрделенеді. Алайда, жұмыс барысында реактивтіліктің өзгеруі айтарлықтай емес, ол реттеу мәселесін жеңілдетеді. Реактивтіліктің аз өзгеруі улану әсерінің жоқтығына негізделген, қалған отынның жануы екіншілік

отынның жинақталуымен компенсацияланады. Осылайша реттеу және компенсациялау органдарының жері салыстырмалы төмен.

Шапшаң нейтронды реакторлардың жиынтық ӨК активті орта мен өндіріс аумағы ӨК-нен жинақталады. Мұнда активті орта аумақ ӨК-ті бірге жуық болатындай етіп отын құрамы таңдалады. Осылайша активті аумақтың отынды тығырықтың салуын анықтайтын жоғары байытылған отын құрамында бөлінуші нуклидтермен қатар өндіруші материал болады. реактор үлкен болған сайын аумаққа шикізат материал соғұрлым көп орналасады.

Шапшаң нейтронды реакторлар жылулық нейтронды реакторларға қарағанда біршама ерекшелікке ие: ядролық отынды салу қымбат, активті ортаның энергия қуаты жоғары, салқындатқышқа қатаң талап қояды. Бұның барлығы шапшаң реакторлардың даму жылулық реакторларына қарағанда төмен екенін көрсетті [10].

### *Натрий салқындатқышты шапшаң нейтронды реакторлар*

Жұмыс жасап тұрған шапшаң нейтронды реакторларда салқындатқыш ретінде сұйық натрий қолданылады. Салыстырмалы жоғары тығыздық пен жақсы жылу өткізгіштік қасиетіне байланысты, ол жылу берудің жоғарғы қасиетіне ие, бұл жоғары кернеулі реакторлар үшін қолайлы салқындатқыш. Натрий нейтрондарды әлсіз сейілтеді. Оның балқу температурасы 97,3<sup>0</sup>С. Сұйық натрий жоғары температурада жоғарғы қысымды талап етпейді.

Алайда натрий ауадағы оттегімен байланысқанда жоғарғы химиялық активтілік көрсетеді, ол технологиялық қатынасты күрделендіреді. Су мен натрий араласса, жарылыс тудыратындай қышқылдану процесі жүреді. Сондықтан натрий салқындатқышты шапшаң нейтронды реакторлары бар АЭС-да жылу шығарудың үш контурлы жүйесі қарастырылған. Екінші аралық контурда біріншідегідей натрий циркуляцияланады. Ол аралық жылу алмастырғышта біріншілік салқындатқыштан қызады және жылуды бу генераторындағы үшінші контурдағы жұмыс денесіне береді. Бұл жүйені күрделендіреді және орнату бағасын жоғарлатады, бірақ жүйенің қауіпсіздігін арттырады, себебі радиактивті натриймен судың байланысын болдырмайды.

БН-350 бірінші корпусында тек реактор орналасқан, ол салқындатқыш ішкі петель бойынша циркуляцияланады және шығарылған аралық жылу алмастырғыштарда жылуды радиактивті емес аралық контур натрийіне береді. Реактордың цилиндрлі корпусы тот баспайтын болаттан жасалған. Оның төменгі бөлігінде активті орта мен өндіру аумағы орналасқан. Натрий салқындатқыш реактордың активті ортасының астында орналасқан ағынды коллектордан және төменгі патрубкка қатарынан келеді, активті және өндіру ортасындағы параллельді ЖШЖ-ға беріледі. Корпус корпусының герметикалығының индикаторы болып табылатын, инертті газбен толтырылған шелі бар қаппен ішкі жағынан қапталған. Ол сұйық натриймен толтырылғанда корпусының қызуы үшін қолданылады. Корпус экран мен корпусының ішкі беткейінің аралығындағы шелге ағынды коллектордан келетін «салқын» натриймен жуылады [15].

## *Газбен салқынданатын шапшаң нейтронды реакторлардың дамуы*

Натрий салқындатқышының қосымша шығындары жаңа салқындатқыш қарастыруға себеп болды. Қазіргі уақытта гелийді қолдануға үлкен үміт артылып отыр, себебі гелий жылулық нейтронды жоғары температуралы реакторларда қолданылған. Гелий салқындатқышының артықшылығы ол нейтрондарды сіңірмейді және сейілтпейді. Сондықтан гелий активті ортадан өткенде активтелмейді және нейтрондар спектрін жұмсартпайды. Бұл нәтижесінде биологиялық қорғанысты жақсартады, ӨК арттырады, екі еселену уақытын қысқартады. Гелийді қолдану қарапайым бу циклында жылу берудің екі контурлы жүйесіне немесе бір контурлы газ құбырды жүйегек көшуге мүмкіндік береді.

Гелий салқындатқышының кемшілігі – тығыздығының салыстырмалы төмендігі, сондықтан шапшаң нейтронды жоғары кернеулі реакторда жылу берілумен қамтамасыз ету үшін жоғары қысым қажет (10 МПа). Бұл өлшем салқындатқыштың қысымы 5 МПа, темірбетонды корпусты шапшаң нейтронды жоғары температуралы реакторды тікелей падалануға мүмкіндік бермейді. Алайда, шет елде бірінші корпус интегралды, темірбетонды корпусты реакторлар қолданылады. Гелий салқындатқышты қолдануды жетілдірумен туындайтын мәселелерді шешу қарастырылуда.

Шапшаң нейтронды реакторлардың бумен салқындататын жобалары бар. Оларды газбен салқындататыннан қарағанда жылу беру әсері жоғары. Алайда, салқындатқышта сутек ядроларының болуы нейтрондардың энергетикалық спектрін жұмсартпайды, ол ӨК-не кері әсер етеді [13].

### *IV буын реакторлары*

IV буын реакторлары – ядролық реакторлардың теориялық конструкцияларының жиынтығы. Олар әдетте 2040-2050 жылдарға дейін коммерциялық мақсатта пайдалану қол жетімді болады деп күтілмейді, дегенмен Дүниежүзілік ядролық қауымдастықтың кейбіреулері 2030 жылға дейін коммерциялық пайдалануға кірісуі мүмкін деп болжады. Дүние жүзінде жұмыс істеп тұрған қазіргі реакторлар әдетте екінші болып саналады. Үшінші буын жүйелері, бірінші буын жүйелері біраз уақыт бұрын жұмыстан шығарылды. Осы реакторлар түрлерін зерттеуді ресми түрде IV ұрпақ халықаралық форумы сегіз технологиялық мақсатқа негізделген. Негізгі мақсаттар ядролық қауіпсіздікті арттыру, таралуға төзімділікті арттыру, қалдықтар мен табиғи ресурстарды пайдалануды азайту, сондай-ақ осындай зауыттарды салу мен іске қосу шығындарын азайту [3].

### *V буын реакторлары*

V буын реакторлары – теориялық тұрғыдан мүмкін болатын, бірақ қазіргі уақытта белсенді түрде қарастырылмайтын немесе зерттелмейтін



конструкциялар. Кейбір V буындағы реакторларды қазіргі немесе жақын мерзімдегі технологиямен әлеуетті түрде салуға болатынына қарамастан, олар экономика, практикалық немесе қауіпсіздік себептеріне байланысты қызығушылық тудырмайды [3].

### *Термоядролық реакторлар*

Бақыланатын ядролық синтез, негізінен, актинидтермен жұмыс істеу қиындықтарсыз қуат өндіру үшін термоядролық электр станцияларында қолданылуы мүмкін, бірақ маңызды ғылыми және техникалық кедергілер әлі де бар. Зерттеулер 1950 жылдары басталғанына қарамастан, 2050 жылға дейін коммерциялық термоядролық реактор күтілмейді [3].

### *Табиғи ядролық реакторлар*

Екі миллиард жыл бұрын Батыс Африкадағы Габондағы Окло деп аталатын аймақта өзін-өзі қамтамасыз ететін ядролық бөліну «реакторларының» сериясы өздігінен құрастырылған. Сол жердегі және уақыттағы жағдайлар жасалған ядролық реактордағы жағдайларға ұқсас жағдайлармен табиғи ядролық ыдырауға мүмкіндік берді.

Мұндай реакторлар қазіргі геологиялық кезеңде Жерде енді қалыптаса алмайды. Жүздеген миллион жыл уақыт аралығында бұрын көбірек болатын уран-235-тің радиоактивті ыдырауы осы табиғи бөлінетін изотоптың үлесін модератор ретінде тек қарапайым сумен тізбекті реакцияны қолдау үшін қажетті мөлшерден төменге дейін төмендетті.

Бұл табиғи реакторларды геологиялық радиоактивті қалдықтарды кәдеге жаратуға мүдделі ғалымдар кеңінен зерттейді. Олар радиоактивті изотоптардың жер қыртысы арқылы қалай қоныс аударатынын зерттеуді ұсынады. Бұл дау-дамайдың маңызды саласы, өйткені геологиялық қалдықтарды кәдеге жаратудың қарсыластары сақталған қалдықтардың изотоптары сумен қамтамасыз етілуі немесе қоршаған ортаға таралуы мүмкін деп қорқады [8].

## 2 НЕГІЗГІ БӨЛІМ

### 2.1 Қазақстан үшін ядролық реакторды салудың тиімді әрі тиімсіз жақтары

Қазақстан және бүкіл әлем бойынша АЭС-тің тиімді әрі тиімсіз жақтарын қарастыратын болсақ басқа мемлекеттердің көзқарасын төменде көре аламыз.

Атом электр станцияларының пайдасы:

- Уран салыстырмалы түрде арзан отын болып табылады. Уран кен орындары дүние жүзінде кең таралған;
- Атом электр станцияларына техникалық қызмет көрсету өте маңызды процесс, бірақ оны дәстүрлі электр станцияларына жанармай құю және техникалық қызмет көрсету сияқты процестерін жиі жасауды қажет етпейді;
- Атом электр станциялары қазба отынының электр станцияларынан айырмашылығы, парниктік газдар, көміртегі тотығы немесе жанғыш ластаушы заттар шығармайды;
- Барлық сақтық шараларымен салынған және жұмыс істейтін атом электр станциялары әлемдік экономикаға электр қуаты үшін қазба отындарына тым тәуелділіктен арылуға көмектеседі.

Атом электр станцияларының кемшіліктері:

- Ядролық реакторлардың қалдықтары көптеген жылдар бойы радиоактивті болып қалады. Оларды жоюдың қолданыстағы және перспективалық әдістері техникалық, экологиялық және саяси мәселелермен байланысты;
- Бөлінетін материалдарды отын ретінде пайдалану үшін электр станцияларына тасымалдау және радиоактивті қалдықтарды көму орындарына тасымалдау ешқашан қауіпсіз бола алмайды. Қауіпсіздікті бұзудың салдары апатты болуы мүмкін;
- Бөлінетін ядролық материалдардың қате қолға түсіп кетуі ядролық терроризмді немесе бопсалауды тудыруы мүмкін.

Қазақстанға келетін болсақ, бізде халықтың көпшілігі АЭС-ті салуға қарсы, негативті көзқараста. Бұлай қарсы болудың да өз себептері бар. Олардың бірі Семей полигоны. Ол апатты өз көзімен көріп, бас кешкендіктен әлбетте қарсы пікірде. Және Фукусима мен Чернобыль апаттары да осындай көзқарас тудырды. Бірақ соңғы жаңалықтарға қарасақ Алматы обласы, Үлкен ауылы яғни, Балхаш көлінің маңына салуды жоспарлау ойластырып отырғанын көре аламыз. Осы мақсатта Франциямен келіссөздер жүргізілгенін көре аламыз. Жалпы қарасақ Қазақстан тұрғындары әлі де дайын емес, бірақ та оны зерттеп қарасақ, техникалық қауіпсіздік шараларын, барлық параметрлерді дұрыс қолданса АЭС өте тиімді болады деген ойдамын [3].

## 2.2 Ұсынылған тұжырымдама

Қазіргі қолданыстағы АЭС-тің ең негізгі бөлігі болып саналатын ядролық реакторлар типтері бойынша 4 жікке бөліп зерттеу жүргізілді. Олардың ерекшеліктері мен кемшіліктерін өзара салыстыра келе төмендегідей қорытындыдан Қазақстанға қай ядролық реактор қолайлы екенін тұжырымдадым:

Ауыр сулы реакторлар. Бұл типтегі реакторлар баяулатқыш ретінде ауыр суды  $D_2O$  пайдаланады. Ал салқындатқыш ретінде қажетіне қарай ауыр су, жеңіл су және газды қолданады. Ауыр судың ең негізгі артықшылығы нейтрондарды жұтпайтындығында. Сондықтан бұл типтегі реакторларда ядролық отын ретінде байытылмаған табиғи уран қолданылады. Алайда, бұл типтегі реакторлардың ең үлкен кемшілігі бағасының өте қымбаттығы мен радиоактивтік қалдықтарды көп шығаратындығында. Яғни, салған ақша тым көп болады десек те болады. Әдеттегі судың құрамындағы ауыр судың мөлшері 0,01557% болатындығын ескерсек оны 100%-ға жуық байытудың қаншалықты қиын және қаншалықты көп қаражат жұмсалатындығын түсіну қиын емес деп айтсақ болады. Ауыр сулы реактор қаржы мәселесі бойынша Қазақстанға тиімсіз деп қарастырдым.

Графитті реакторлар. Бұл типтегі реакторлар баяулатқыш ретінде графитті, ал салқындатқыш ретінде газды немесе жеңіл суды қолданады. Графиттің нейтронды баяулату қабілеті жеңіл суға қарағанда нашар болғанымен нейтрондарды жұтпайтындықтан ядролық отын ретінде табиға уранды пайдаланады. Бұл оның ең үлкен артықшылығы. Графитті реакторларда жеңіл сулы реакторларға қарағанда ядролық әскери қару — атом бомбаның материалы плутоний-239 көп пайда болады. Сондықтан қазірге дейін плутоний-239 өндірісінде осындай типтегі реакторлар қолданылып келді. Графитті реакторлардың жоғарыдағыдай артықшылықтарымен қатар кемшіліктері де жетерлік. Төтенше жағдайлар кезінде реакторды шұғыл тоқтату үшін тежегіш стержендерді бір уақытта реактордың белсенді аумағына енгізуге тура келеді. Бұл кезде реакторда орнықсыздық байқалып қауіпсіздікке қатер төндіруі мүмкін. Нейтронды баяулату қабілеті жеңіл суға қарағанда нашар болғандықтан реактордың белсенді аумағының көлемі жеңіл сулы реакторлардан үлкен болады. Бұл жеңіл сулы реакторларға қарағанда бірлік көлемдегі қуаты төмен дегенді білдіреді. Графиттің массасы ауаның құрамындағы оттегімен әсерлесу нәтижесінде біртіндеп азаятындықтан үнемі көңіл бөлуге тура келеді. Оның үстіне графит морт сынғыш (оңай сынады) болғандықтан үлкен көлемде қолдануға қолайсыздық тудырады. Ядролық қаруларды өндіруге шектеу қойылғандықтан бұл типтегі реакторлар бұдан бұлай жасалмауы да мүмкін. Графит реакторлар көміртегі, өзі жеңіл, баяулатуға күші жетпейді. Басқа Еуропа елдері сенімсіздік білдірген және де Чернобыль апаты да осы реакторға тікелей қатысты. Қазақстанға бұл реактор осындай себептерге орай келмейді деген тұжырымдамын [22].

Шапшаң нейтронды реакторлар. Бұл типтегі реакторлардың негізгі ерекшелігі баяулатқыш қолданбай шапшаң нейтрондар арқылы ядролық бөліну

реакциясын жүргізе алатындығы.  $U^{235}$  шапшаң нейтрондар арқылы бөлінбейді, бірақ  $U^{238}$  шапшаң нейтрондарды қармау арқылы ядролық отын  $Pu^{239}$ -ға айналады  $U^{238} + n \rightarrow U^{239}(\beta^-) \rightarrow Np^{239}(\beta^-) \rightarrow Pu^{239}$ .  $Pu^{239}$  шапшаң нейтрондар арқылы тізбекті ядролық реакцияға қатысады. Әрбір бөліну кезінде пайда болған 3 нейтронның екеуі  $U^{238}$ -ді  $Pu^{239}$ -ға айналдырса, қалған бір нейтрон арқылы  $Pu^{239}$  бөлініп тізбекті реакция жалғасады. Демек, жұмсалған отынға қарағанда жаңадан пайда болған отын мөлшері көп болады. Міне, бұл шапшаң нейтронды реакторлардың ең негізгі артықшылығы. Ғалымдардың есебі бойынша егер қазіргі қолданыстағы энергетикалық реакторлар арқылы  $U^{235}$  күйдіре берсек, алдағы 50 жылда уран қоры таусылып бітуі мүмкін. Ал шапшаң нейтронды реакторларды өндіріске енгізер болсақ, табиға уранның 99,3% үлесін алатын  $U^{238}$  қолдану арқылы уран қорын 2000 жылға дейін ұзартуға болар еді. Шапшаң нейтронды реакторларды салқындатқыш яғни, жылу тасымалдағышы ретінде сұйық күйдегі натрий қолданылады. Сұйық натрийдың жылу өткізу қабілеті судан 100 есе жоғары, нейтрондарды аз жұтады және шапшаң нейтрондарды баяулатпайтын қасиеттерге ие. Шапшаң нейтронды реакторлардың жоғарыдағыдай артықшылығы болғанымен әлі күнге дейін энергетика өндірісінде қолданысқа түсен жоқ. Оның басты себебі жылу тасымалдағыш жүйесіндегі кемшіліктер. Натрий ауадағы оттегімен байланысқанда жоғарғы химиялық активтілік көрсетеді, ол технологиялық қатынасты күрделендіреді. Су мен натрий араласса, жарылыс тудыратындай қышқылдану процесі жүреді. Сондықтан онымен жұмыс жасау үшін өте жоғары техниканы және сол техниканы қауіпсіз басқару үшін бір тұтас жүйені қажет етеді. Егер техникалық қауіпсіздік мәселелері шешілсе, болашақта жеңіл сулы реакторлардың орнын шапшаң нейтронда реакторлар басуы мүмкін. Бірақ бұл мәселе оңай шешілмейтіндей. Және де дәл осы реактор Қазақстанда Ақтауда БН-350 болған. Пайдаланудан шығарылғанына 25 жыл болды. Ал оның радиациясы әлі күнге дейін бар. Яғни, олар қалың бетондармен жабылған. Оның радиациясы 1000 жылда тарайды. Яғни, бұл реактор түрі Қазақстанда болған, тек радиация қалды десек те болады бұл реактордан. Осындай себептерге орай бұл реактор да Қазақстанға қолайсыз деп қарастырсам болады [3].

Жеңіл сулы реакторлар. Бұл типтегі реакторлар баяулатқыш және салқындатқыш ретінде кәдімгі жеңіл суды  $H_2O$  пайдаланатындықтан, олар әлемде кең қолданысқа ие болып табылады. Судың құрамындағы сутегі атомының ядросымен ядролық бөліну кезінде пайда болған шапшаң нейтрон өзара әсерлесіп соқтығысу нәтижесінде шапшаң нейтрондардың жылдамдығы баяулайды. Көп реткі соқтығысқаннан кейін шапшаң нейтрондар баяу нейтрондарға айналады. Сондықтан осы типті реакторларда нейтрондары баяулатқыш қасиеті күшті жеңіл суды баяулатқыш ретінде қолданады. Ауыр сулы реакторлардың BWR және PWR реакторларын Қазақстанға қолдануға өте қолайлы дер едім. Өйткені, бұл реакторлар 2 және 3 циклды және су буға, бу суға айнала отырып энергия алынатын реакторлар болып келеді. Дәл осы реакторлар өндірісте әлем бойынша 60 жылдан аса қолданылды. Тағы бір мән беретін факт Жапонияда осы реакторлардың қолданылған суын балық өндірісіне қолданды.

Яғни, радиациясы болса, балық шаруашылығына қолданбас еді. Осындай себептерге орай Қазақстан егер де болашақта ядролық реактор салуды жоспарласа екі реакторды ойланбастан ұсынар едім [20].

## ҚОРЫТЫНДЫ

Дипломдық жұмысты қорытындылай келетін болсам, мен ядролық реактор дегеніміз не? Оның түрлері, адамзатқа әсері, пайдасы және зиянын, сонымен қатар қазіргі қолданысы бойынша ядролық реакторды Қазақстанда салған жағдайда, қай реактор түрі қолайлы болар еді деген тұжырымдауға жауап қарастырып көрдім. Яғни, қысымды су реакторлары ең қолайлы деп қарастырсақ болады. Жеңіл сулы реакторлардың BWR және PWR реакторларын Қазақстанға қолдануға өте қолайлы дер едім. Өйткені, бұл реакторлар 2 және 3 циклды және су буға, бу суға айнала отырып энергия алынатын реакторлар болып келеді. Тағы бір мән беретін факт Жапонияда осы реакторлардың қолданылған суын балық өндірісіне қолданды. Яғни, радиациясы болса, балық шаруашылығына қолданбас еді. Осындай себептерге орай Қазақстан егер де болашақта ядролық реактор салуды жоспарласа екі реакторды ойланбастан ұсынар едім.

## ҚЫСҚАРТЫЛҒАН СӨЗДЕР

**ЖШЖ** - жылу шығарғыш жинақ

**ЖСР** - Жеңіл сулы реактор

**ӨК** - Өндіру коэффициенті

**ЖБЭЛ** - Жылу бөлгіш элемент

**АЖЭО** - Атом жылу электр орталығы

**РС** - Реттеуші стержень

**ЯЭҚ** - Ядролық энергетикалық қондырғы

**NTD** - Нейтронды трансмутациялық допинг

**MTR** - Материалдарды сынау реакторларында

**HALEU** - Жоғары талдауы төмен байытылған уран

**KAERI** - Корея атом энергия зерттеу институты

**VVER 1200** - Қысымды сумен жұмыс істейтін реактор

**INL** - Айдахо ұлттық зертхана

**MNSRS** - Шағын нейтронды көзді реактор

## ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 National Nuclear Security Administration, NNSA reaches milestone in developing new nuclear fuel for U.S. high-performance research reactors (20 December 2017)
- 2 ФЭИ Росатом. БН-350 – первый быстрый энергетический реактор. Новости Актау и Мангистауской области - ЛАДА.kz. Дата обращения: 6 августа 2020. Архивировано 24 апреля 2021 года.
- 3 Oldekor, W. (1982), "Electricity and Heat from Thermal Nuclear Reactors", *Primary Energy*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 66–91, doi:10.1007/978-3-642-68444-9\_5, ISBN 978-3-540-11307-2, retrieved 2 February 2021
- 4 University of Chicago. "The first nuclear reactor, explained | University of Chicago News". News.uchicago.edu. Retrieved 2 August 2022.
- 5 "Chernobyl: what happened and why? by CM Meyer, technical journalist" (PDF). Archived from the original (PDF) on 11 December 2013.
- 6 Status of Subsequent License Renewal Applications. NRC, 24 Feb 2022
- 7 What's the Lifespan for a Nuclear Reactor? Much Longer Than You Might Think. Office of Nuclear Energy, 16 Apr 2020
- 8 The True Lifespan of a Nuclear Power Plant. Seacoast Anti-Pollution League (SAPL), 2017
- 9 Nuclear decommissioning. EDF (accessed Feb 2023)
- 10 Lifetime extension of ageing nuclear power plants: Entering a new era of risk. Greenpeace, March, 2014 (2.6 MB). In German
- 11 The Nuclear Option — NOVA | PBS". www.pbs.org. Retrieved 12 January 2017.
- 12 Nuclear Power Reactors in the World – 2015 Edition" (PDF). International Atomic Energy Agency (IAEA). Retrieved 26 October 2017.
- 13 Nave, R. "Light Water Nuclear Reactors". *Hyperphysics*. Georgia State University. Retrieved 5 March 2018.
- 14 Joyce, Malcolm (2018). "10.6". *Nuclear Engineering*. Elsevier. doi:10.1016/c2015-0-05557-5. ISBN 9780081009628.
- 15 "Emergency and Back-Up Cooling of Nuclear Fuel and Reactors and Fire-Extinguishing, Explosion Prevention Using Liquid Nitrogen". *USPTO Patent Applications*. Document number 20180144836. 24 May 2018.
- 16 "Russia completes world's first Gen III+ reactor; China to start up five reactors in 2017". *Nuclear Energy Insider*. 8 February 2017. Retrieved 10 July 2019.
- 17 Generation IV Nuclear Reactors. World Nuclear Association, update Dec 2020
- 18 "High Efficiency Nuclear Power Plants Using Liquid Fluoride Thorium Reactor Technology" (PDF). NASA. Retrieved 27 October 2014.
- 19 "The Venezuela-China relationship, explained: Belt and Road | Part 2 of 4". *SupChina*. 14 January 2019. Archived from the original on 24 June 2019. Retrieved 24 June 2019.



- 20 "Rolls-Royce Touts Nuclear Reactors as Key to Clean Jet Fuel". *Bloomberg News*. Archived from the original on 19 December 2019. Retrieved 19 December 2019.
- 21 De Clercq, Geert (13 October 2014). "Can Sodium Save Nuclear Power?". *Scientific American*. Retrieved 10 August 2022.
- 22 National Nuclear Security Administration, NNSA reaches milestone in developing new nuclear fuel for U.S. high-performance research reactors (20 December 2017)
- 23 World Nuclear Association, World Nuclear Performance Report 2022
- 24 OECD International Energy Agency, *World Energy Outlook 2022*
- 25 "Uranium". *Encyclopaedia Britannica*. Retrieved 22 April 2017.
- 26 "The History of Ore & Uranium Mining in Czechia". November 2017.

Университеттің жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаменті директорының ұқсастық есебіне талдау хаттамасы

Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры көрсетілген еңбекке қатысты дайындалған Плагиаттың алдын алу және анықтау жүйесінің толық ұқсастық есебімен танысқанын мәлімдейді:

Автор: Акмолдаева Салтанат

Тақырыбы: Қазіргі қолданыстағы ядролық реакторларды зерттеу

Жетекшісі: Дуаметұлы Б.

1- ұқсастық коэффициенті (30): 7.9

2- ұқсастық коэффициенті (5): 4.8

Дәйексөз (35): 0.7

Әріптерді ауыстыру: 2

Аралықтар: 0

Шағын кеңістіктер: 35

Ақ белгілер: 0

Ұқсастық есебін талдай отырып, Жүйе администраторы мен Академиялық мәселелер департаментінің директоры келесі шешімдерді мәлімдейді :

Ғылыми еңбекте табылған ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді. Осыған байланысты жұмыс өз бетінше жазылған болып санала отырып, қорғауға жіберіледі.

Осы жұмыстағы ұқсастықтар плагиат болып есептелмейді, бірақ олардың шамадан тыс көптігі еңбектің құндылығына және автордың ғылыми жұмысты өзі жазғанына қатысты күмән тудырады. Осыған байланысты ұқсастықтарды шектеу мақсатында жұмыс қайта өңдеуге жіберілсін.

Еңбекте анықталған ұқсастықтар жосықсыз және плагиаттың белгілері болып саналады немесе мәтіндері қасақана бұрмаланып плагиат белгілері жасырылған. Осыған байланысты жұмыс қорғауға жіберілмейді.

Негіздеме:

Күні

Кафедра меңгерушісі

29.05.2023



Кудайбергенов К.К.

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРҒЫ БІЛІМ  
МИНИСТРЛІГІ  
Қ.И. СӘТБАЕВ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ ТЕХНИКАЛЫҚ  
ЗЕРТТЕУ УНИВЕРСИТЕТІ

Рецензия

Дипломдық жұмыс

Акмолдаева Салтанат Жолдасбекқызы

6B07109 – «Инженерлік физика және материалтану» білім беру  
бағдарламасы

Тақырыбы: «Қазіргі қолданыстағы ядролық реакторларды зерттеу»

Жұмыс кіріспе, теориялық бөлім және қорытындыдан тұрады. Бірінші бөлімде ядролық реакторлар жайында жалпы мағлұмат беріледі. Мұнда ядролық реакторлардың жұмыс істеу принципі мен негізгі қасиеттері, реакторлардың құрамы мен материалдары және оларға қойылатын талаптар баяндалады. Сонымен қатар ядролық реакторлар негізгі типтері баяндалады. Қорытындыда ядролық реакторларды өзара салыстырып олардың артықшылықтары мен кемшіліктері анықталады. Соның нәтижесінде Қазақстанда салынуға тиімді АЭС-тің үлгісі «қысымды сулы реактор» екендігі анықталады.

Диплом жұмысын жазу барысында студент қазақ, орыс және ағылшын тілінде жазылған материалдарды пайдаланып оларды теориялық бөлімде дұрыс пайдалана білді. Жазылған диплом жұмысының тілі жатық, оқырманға түсінікті, келтірілген мысалдар мен суреттер үйлесімді шешімін тапқан.

Жұмыстың кемшілігі ретінде мәтінде кездесетін кейбір орфографиялық, стильдік қателерді көрсетуге болады.

### ЖҰМЫСТЫҢ БАҒАСЫ

Студент жұмысты орындау барысында өзінің білім деңгейінің жоғары екендігін көрсете білді, диплом жұмысы қойылған талаптарға сай, Акмолдаева Салтанаттың еңбегін өте жақын 90% деп бағалаймын.

Рецензент:

Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Физика-техникалық  
факультет, Қатты дене физикасы және  
бейсызық физика кафедрасы  
PhD, қауымдастырылған профессор  
Мұхаметқаримов Е.С.  
«25» маусым 2023 ж.





ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҒЫЛЫМ ЖӘНЕ ЖОҒАРҒЫ БІЛІМ  
МИНИСТРЛІГІ  
Қ.И. СӘТБАЕВ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ ТЕХНИКАЛЫҚ  
ЗЕРТТЕУ УНИВЕРСИТЕТІ

Дипломдық жұмыс

Акмолдаева Салтанат Жолдасбекқызы

6B07109 – «Инженерлік физика және материалтану» білім беру  
бағдарламасы

Тақырыбы: «Қазіргі қолданыстағы ядролық реакторларды зерттеу»

**ПІКІР**

Жұмыс кіріспе, теориялық бөлім және қорытындыдан тұрады. Бірінші бөлімде ядролық реакторлар жайында жалпы мағлұмат беріледі. Мұнда ядролық реакторлардың жұмыс ітеу принципі мен негізгі қасиеттері, реакторлардың құрамы, материалдары және оларға қойылатын талаптар баяндалады. Сонымен қатар ядролық реакторлар негізгі типтері баяндалады. Қорытындыда ядролық реакторларды өзара салыстырып олардың артықшылықтары мен кемшіліктері анықталады.

Жұмысты орындау барысында Акмолдаева Салтанат атом реакторлары жайлы мәліметтерді мұқият зерттеп, оған сараптама жасаған. Жазылған диплом жұмысының тілі жатық, оқырманға түсінікті, келтірілген мысалдар мен суреттер үйлесімді шешімін тапқан. Тұжырымдама нәтижесі бойынша Қазақстанда салуға тиімді АЭС-тің ең қолайлы үлгісі — «қысымды сулы реактор» екендігі анықталды.

Жұмыстың кемшілігі ретінде мәтінде кездесетін кейбір орфографиялық, стильдік қателерді көрсетуге болады.

**ЖҰМЫСТЫҢ БАҒАСЫ**

Жоғарыда айтылғандарды ескере отырып, диплом жұмысы қойылған талаптарға сай, Акмолдаева Салтанаттың еңбегін *өте жақсы, 90%* деп бағалаймын.

Пікір жазушы:

Сәтбаев университеті  
Жалпы физика кафедрасының  
Қауымдастырылған профессоры  
физика-математика ғылымдарының кандидаты  
*Дуаметұлы Б.*  
«*14*» *мамыр* 2023 ж.