



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
MEHAANIKATEADUSKOND

Soojustehnikainstituut
ÕppekavaMASB

MSE40LT

Jegor Jefimov

**Tuumaenergeetika arengud maailmas ja perspektiivid
Eestis
Bakalaureusetöö**

Autor taotleb
tehnikateaduste bakalaureuse
akadeemilist kraadi

Tallinn
2016

AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis..... juhendamisel

“.....” 201...a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

“.....” 201...a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....” 201... a.

..... allkiri

TTÜ soojustehnika instituut

Soojusenergeetika õppetool

BAKALAUREUSETÖÖ ÜLESANNE

2016. aasta kevadsemester

Üliõpilane: Jegor Jefimov, 123814

Õppekava: soojustehnika

Juhendaja: prof. Aadu Paist

Konsultandid: Aadu Paist, prof., õppetooli juhataja

BAKALAUREUSETÖÖ TEEMA:

Tuumaenergeetika arengud maailmas ja perspektiivid Eestis

Nuclear energy developments and prospects in Estonia

Lõputöös lahendatavad ülesanded:

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Tuumaenergeetika tänapäeval	15.03.16
2.	Tuleviku tuumaenergia	21.03.16
3.	Toorium kui tuumakütus	05.04.16
4.	Tuumaenergeetikast Eestis	09.05.16

Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:

"Seoses kliimasoojenemisega" on vajavähendada fossiilsete kütustekasutamist ning suurendada taastuvate energiaallikate hulga kasu tuumaenergiakasutamist. seal

Töö keel: vene

Kaitsmistaotlus esitada hiljemalt 31.05.16 **Töö esitamise tähtaeg** 06.06.16

Üliõpilane Jegor Jefimov /allkiri/ kuupäev.....

Juhendaja Aadu Paist /allkiri/ kuupäev.....

Sisukord

Autorideklaratsioon	2
Bakalaureusetöö ülesanne.....	3
Sisukord.....	4-5
Eessõna	6
Sissejuhatus.....	7
1.Атомная энергетика сегодня.....	8
1.1.Страны, использующие АЭС.....	9
1.2.Ядерный топливный цикл.....	10-11
1.3.Ядерные реакторы.....	12-14
1.4.Экономическое значение.....	15
1.5.Проблемы.....	16-17
2.Будущее ядерной энергетики.....	18-19
2.1.Инновационные ядерные системы IV поколения.....	20-21
2.2.Устойчивое развитие.....	22-23
2.3.Конкурентоспособность.....	24-25
2.4.Безопасность и надежность.....	26
2.5.Инновационные системы IV поколения и топливные циклы.....	27
3.Торий.Мировые ресурсы.....	28
3.1.Ядерное топливо.....	29-31
3.2.Реакторы, работающие на тории.....	32-33

3.3.Реактор на расплавах солей.....	34
3.4.Реактор, инициируемый ускорителем.....	35
3.5.Ториевое топливо в качестве электроэнергии.....	36
3.6.Разработка ториевого топливного цикла циклов.....	37-38
3.7.Недостатки тория.....	39-40
3.8.Преимущества ториевой энергетики.....	41
4.Атомная энергетика в Эстонии.....	42
Заключение.....	43
Summary.....	44
Список используемой литературы.....	45
Eesti keelne kokkuvõte.....	46-54

Eessõna

Käesoleva töö teema on valitud töö koostaja enda initsiatiivil, innustatuna töö koostamise ajal Eesti ühiskonnas ja ka laiemalt kogu maailmas aktuaalsetest küsimustest energeetika tuleviku ja tuumaenergeetika arendamise osas.

Materjalide kogumisel oli abiks töö juhendaja prof. Aadu Paist.

Ühtlasi sooviks töö autor siinkohal avaldada tänu kõigile infot jaganud ja töö koostamisel abiks olnud isikutele.

Sissejuhatus

Hoolimata keskkonnakaitsjate protestidest kasutatakse tuuma energeetikapaljude riikides. Praegu on maailmas üle 400 tuumareaktori. Kõige rohkem tuumareaktoreid kasutatakse Ameerika Ühendriikides (99), teisel kohal on Prantsusmaa. Tuumajaamad töötavad usaldusväärset praktiliselt kõikides tuumaenergiat kasutavates riikides. Euroopas võimaldavad nad vähendada emissiooni umbes 700 miljonit tonni CO₂. Venemaal töötab 10 (TEJ) 35 energiablokiga vähendades igal aastal atmosfääri paisatavat CO₂ kogust umbes 210 miljoni tonni.

Miks see on oluline? Maailmas toimub globaalne soojenemine. Üks selle põhjuseid on "kasvuhooneefekt": süsinikdioksiidi sisalduse kasv atmosfääris, aga ka metaani, lämmastikoksiidi, perfluorossivesiniku, hüdroluorosüvesiniku ja väävelheksafluoriidi mõju. Sellest tingituna on suurenenud ka keskmine temperatuur Maa pinnal. Viimase 100 aasta jooksul on Maa keskmine temperatuur tõusnud 0,74 kraadi Celsiuse järgi. Kliimamuutuse tagajärjed on näha juba täna, suurenenud on nakkushaiguste levik, sagedus saenenud liustike sulamine ja merevee taseme tõus, suurenenud oht ökosüsteemidele ja bioloogilisele mitmekesisusele. Kõik see tekitab olulist majanduslikku kahju, ähvardab ökosüsteemi stabiilsust, mõjutab inimeste tervist ja elu.
































Üks meetmetest, et võidelda "globaalne soojenemisega" on vähendada fossiilsete kütuste kasutamist ning suurendada taastuvate energiaallikate seal hulgas ka tuumaenergia kasutamist.

1. Атомная энергетика сегодня

В настоящее время уже все поняли, что ядерная энергия — это источник энергии, который открывает абсолютно новые возможности и новые проблемы для развития человечества.^[1] 60 лет назад Энрико Ферми (итальянский физик) писал в своем докладе Конгрессу США, что ядерная энергетика — это новый источник (на основе реакторов-бридеров на быстрых нейтронах, то есть реакторов, которые производят топлива больше, чем сжигают), который при правильном использовании позволит создать практически чистый и неиссякаемый по масштабам развития источник энергии.^[1]

Сейчас для получения атомной энергии используют цепную ядерную реакцию деления ядер Pu_{239} или U_{235} .^[2] Они делятся при попадании в них нейтрона, и при этом получают новые нейтроны и осколки деления.^[2] Нейтроны и осколки деления обладают большой кинетической энергией.^[2] В результате столкновений осколков с другими атомами эта кинетическая энергия моментально преобразуется в тепло.^[2]

1.1. Страны, использующие АЭС

Страна	Мощность, МВт ^[3]	Выработка, ГВт·ч ^[3]	Доля ^[3] (2014 год)	Станций	Блоков ^[3]
 Аргентина	1 627	5 258,17	4,0 %	2	3
 Армения	375	2 265,64	30,7 %	1	1
 Бельгия	5 927	32 093,74	47,5 %	2	7
 Болгария	1 926	15 013,99	33,6%	1	2
 Бразилия	1 884	14 463,39	2,9 %	1	2
 Великобритания	9 373	57 918,48	17,2 %	8	16
 Венгрия	1 889	14 777,73	53,6 %	1	4
 Германия	12 074	91 783,70	15,8 %	8	9
 Индия	5 308	33 237,87	3,5 %	7	21
 Иран	915	3 723,60	1,5 %	1	1
 Испания	7 121	54 860,38	20,4 %	5	7
 Канада	13 500	98 588,12	16,8 %	6	19
 Китай	19 907	123 807,69	2,4 %	13	23
 Мексика	1 330	9 311,60	5,6 %	1	2
 Нидерланды	482	3 873,51	4,0 %	1	1
 Пакистан	690	4 577,53	4,3 %	2	3
 Россия	24 654	169 064,84	18,6 %	10	34
 Румыния	1 300	10 753,68	18,5 %	1	2
 Словакия	1 814	14 420,34	56,8 %	2	4
 Словения	688	6 060,82	37,2 %	1	1
 США	99 244	798 616,26	19,5 %	62	100
 Тайвань	5 032	40 801,06	19,5 %	3	6
 Украина	13 107	83 122,79	49,4 %	4	15
 Финляндия	2 752	22 645,96	34,6 %	2	4
 Франция	63 130	418 001,40	76,9 %	19	58
 Чехия	3 904	28 636,78	34,6 %	2	6
 Швейцария	3 333	26 467,90	37,9 %	4	5
 Швеция	9 470	62 270,05	41,5 %	3	10
 ЮАР	1 860	14 762,70	6,2 %	1	2
 Южная Корея	20 717	149 199,22	30,4 %	6	23
 Япония	42 388	0,00	0,0 %	17	48
В мире	376 821	2 410 372,94	2,6 %^[5]	197	439

[2]

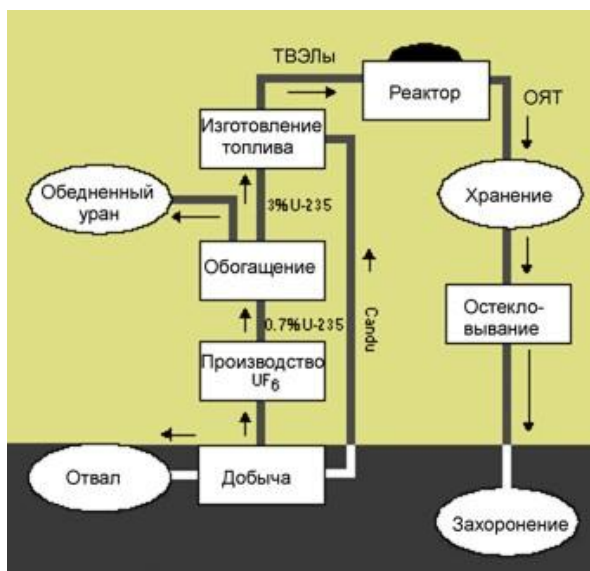
1.2. Ядерный топливный цикл

Ядерный топливный цикл — это последовательность повторяющихся производственных процессов, начиная от добычи топлива и кончая удалением радиоактивных отходов.^[3] В зависимости от вида ядерного топлива и конкретных условий.^[3]

Общие этапы:

- Добыча урановой руды;
- Измельчение урановой руды;
- Отделение диоксида урана, т. н. жёлтого хека, от отходов, тоже радиоактивных, идущих в отвал;
- Преобразование диоксида урана в газообразный гексафторид урана;
- Обогащение урана — процесс повышения концентрации U_{235} ;
- Обратное превращение гексафторида урана в диоксид урана в виде топливных таблеток;
- Изготовление из таблеток тепловыделяющих элементов, которые в скомпанованном виде вводятся в активную зону ядерного реактора АЭС;
- Извлечение отработанного топлива;
- Охлаждение отработанного топлива;
- Захоронение отработанного топлива в специальном хранилище.^[3]

В ходе эксплуатации в процессах технического обслуживания удаляются образующиеся низкорadioактивные отходы.^[3] С окончанием срока службы производится вывод из эксплуатации самого реактора, демонтаж сопровождается дезактивацией и устранением отходов деталей реактора.^[3]



Открытый топливный цикл^[15]

1.3. Ядерные реакторы

Атомный реактор — устройство, предназначенное для организации, управляемой самоподдерживающейся цепной реакции деления, которая всегда сопровождается выделением энергии.^[4]

Любой ядерный реактор состоит из следующих частей:

- Активная зона с ядерным топливом и замедлителем;
- Отражатель нейтронов, окружающий активную зону;
- Теплоноситель;
- Система регулирования цепной реакции, в том числе аварийная защита;
- Радиационная защита;
- Система дистанционного управления.^[4]

Существует большая классификация реакторов:

По назначению:

- Энергетические реакторы;
- Транспортные реакторы;
- Экспериментальные реакторы;
- Исследовательские реакторы;
- Промышленные реакторы;

По спектру нейтронов:

- Реактор на тепловых (медленных) нейтронах;
- Реактор на быстрых нейтронах;
- Реактор на промежуточных нейтронах;
- Реактор со смешанным спектром;

По размещению топлива:

- Гетерогенные реакторы;
- Гомогенные реакторы;

По виду топлива:

- изотопы урана;
- изотоп плутония;
- изотоп тория;

По виду теплоносителя:

- H_2O (Водо-водяной реактор);
- Газ, (Графитогазовый реактор);
- D_2O (Тяжеловодный ядерный реактор);
- Реактор с органическим теплоносителем;
- Реактор с жидкометаллическим теплоносителем;
- Реактор на расплавах солей;
- Реактор с твёрдым теплоносителем;

По роду замедлителя:

- С (графит);
- H_2O (вода);
- D_2O (тяжёлая вода);
- Be, BeO;
- Гидриды металлов;
- Без замедлителя;

По конструкции:

- Корпусные реакторы;
- Канальные реакторы;

По способу генерации пара:

- Реактор с внешним парогенератором;
- Кипящий реактор;

Классификация МАГАТЭ:

- PWR (pressurized water reactors) — водо-водяной реактор (реактор с водой под давлением);
- BWR (boiling water reactor) — кипящий реактор;
- FBR (fast breeder reactor) — реактор-размножитель на быстрых нейтронах;
- GCR (gas-cooled reactor) — газоохлаждаемый реактор;
- LWGR (light water graphite reactor) — графита-водный реактор;
- PHWR (pressurised heavy water reactor) — тяжеловодный реактор.^[4]

Наиболее распространёнными в мире являются водо-водяные (около 62 %) и кипящие (20 %) реакторы.^[4]

1.4. Экономическое значение

В 2014 году ядерная энергия обеспечивала 2,6 % всей потребляемой человечеством энергии.^[5] Ядерный сектор энергетики наиболее значителен в промышленно развитых странах, где недостаточно природных энергоресурсов — во Франции, Украине, Бельгии, Финляндии, Швеции, Болгарии, Швейцарии и Японии. Эти страны производят от 20 до 74 % (во Франции) электроэнергии на АЭС.^[5]

В 2013 году мировое производство ядерной энергии выросло впервые с 2010 года — по сравнению с 2012 годом произошёл рост на 0,5 % — до 6,55 млрд. МВт ч.^[5] Наибольшее потребление энергии атомных станций в 2013 году составило в США — 187,9 млн. тонн нефтяного эквивалента.^[5] В России потребление составило 39,1 млн тонн нефтяного эквивалента, в Китае — 25 млн тонн нефтяного эквивалента, в Индии — 7,5 млн. тонн.^[5]

Согласно отчёту Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), на 2013 год насчитывалось 436 действующих ядерных энергетических, то есть производящих утилизируемую электрическую и тепловую энергию, реакторов в 31 стране мира.^[5]

Примерно половина мирового производства электроэнергии на АЭС приходится на две страны — США и Францию. США на АЭС производят только 1/8 своей электроэнергии, однако это составляет около 20 % мирового производства.^[5]

Абсолютным лидером по использованию ядерной энергии являлась Литва. Единственная Игналинская АЭС, расположенная на её территории, вырабатывала электрической энергии больше, чем потребляла вся республика (например, в 2003 году в Литве всего было выработано 19,2 млрд. кВт·ч, из них — 15,5 Игналинской АЭС). Обладая её избытком, «лишнюю» энергию отправляли на экспорт.^[5]

Однако, под давлением ЕС (из-за сомнений в её безопасности — ИАЭС использовала энергоблоки того же типа, что и Чернобыльская АЭС), с 1 января 2010 года Игналинская АЭС была окончательно закрыта, сейчас решается вопрос о строительстве на той же площадке АЭС современного типа.^[5]

1.5. Проблемы

- Безопасность

Ядерная энергетика остаётся предметом острых дебатов.^[6] Сторонники и противники ядерной энергетики резко расходятся в оценках её безопасности, надёжности и экономической эффективности.^[6] Опасность связана с проблемами утилизации отходов, авариями, приводящими к экологическим и техногенным катастрофам, а также с возможностью использовать повреждение этих объектов обычным оружием или в результате теракта — как оружие массового поражения.^[6] «Двойное применение» предприятий ядерной энергетики, возможная утечка ядерного топлива из сферы производства электроэнергии и его использовании для производства ядерного оружия служит постоянным источником общественной озабоченности, политических интриг и поводов к военным акциям.^[6] Вместе с тем, выступающая за продвижение ядерной энергетики Всемирная ядерная ассоциация опубликовала данные, согласно которым гигаواتт год электроэнергии, произведенной на угольных электростанциях, в среднем обходится в 342 человеческих жертвы, на газовых — в 85, на гидростанциях — в 885, тогда как на атомных — всего в 8.^[6]

- Рентабельность

Высказываются сомнения в рентабельности ядерной энергетики.^[6] В связи с тем, что производство электричества на АЭС дорожает, а цена некоторых других источников электричества снижается, в условиях свободного рынка ядерные станции становятся убыточными.^[6] Так в США по причине нерентабельности были закрыты два реактора: АЭС Вермонт Янки и АЭС Кевони.^[6] Множество проектов строительства новых реакторов отменено или заморожено.^[6] В 2005 году Финляндия выдала разрешение на строительство третьего блока АЭС Олкилуото.^[6] Предполагалось, что энергоблок будет введен в эксплуатацию в 2010 году.^[6] По состоянию на 2015 год предполагается, что реактор не будет запущен ранее 2018 года.^[6] Стоимость строительства данного реактора оценивалась в 3 миллиарда евро. На 2015 год затраты возросли на 2 миллиарда евро.^[6] В итоге Финляндия отменила запланированное строительство четвертого энергоблока на Олкилуото.^[6]

Правительства могут страховать АЭС от закрытия, гарантируя закупку электричества по установленной цене.^[6] Однако такие схемы также подвергаются критике из-за ограничения конкуренции и чрезмерной растраты денег налогоплательщиков.^[6]

- Тепловое загрязнение

Одной из проблем ядерной энергетики является тепловое загрязнение.^[6] По мнению некоторых специалистов, атомные электростанции, «в расчете на единицу производимой электроэнергии», выделяют в окружающую среду больше тепла, чем сопоставимые по мощности ТЭС.^[6]

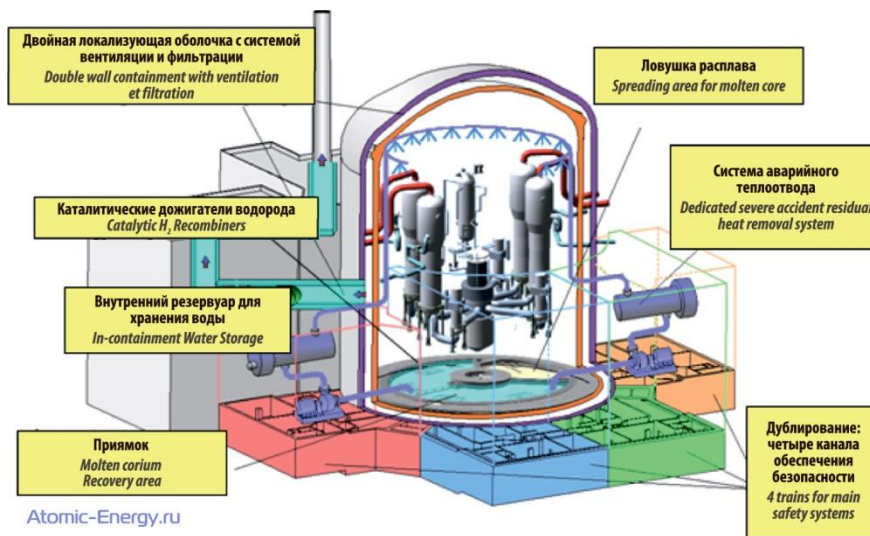
2. Будущее ядерной энергетики

Три фактора делают акцент на атомную энергетику неизбежным.^[7] Во-первых, истощаемость углеводородных ресурсов.^[7] В июле 2011 г. специалисты «British Petroleum» дали прогноз развития добычи углеводородов в 21 веке.^[7] Нефти хватит на 46 лет, газа – на 59 лет.^[7] В то же время ожидается, что глобальное потребление энергоресурсов к 2030 г. увеличится на 60%.^[7]

Во-вторых, загрязненность окружающей среды диктует необходимость переключения на «щадящую» энергетику.^[7] Продолжающееся потепление оборачивается повышением уровня океана, катастрофическими ураганами и, как ни парадоксально, похолоданием в отдельные зимние месяцы из-за нарушения естественных балансов.^[7] Киотский протокол 1997 г. – признание неизбежности свертывания или модернизации направлений сегодняшней энергетики.^[7] Поэтому «от атомной энергетики пока отказаться нельзя – она остается одним из вариантов развития, который может дать реальное снижение давления парниковых газов на климатическую систему», – заявил советник президента России Александр Бедрицкий.^[7] По оценкам экспертов, отказ от атомной энергетики приведет к росту выбросов в атмосферу на 370 млн. т CO₂ в период до 2020 г.^[7]

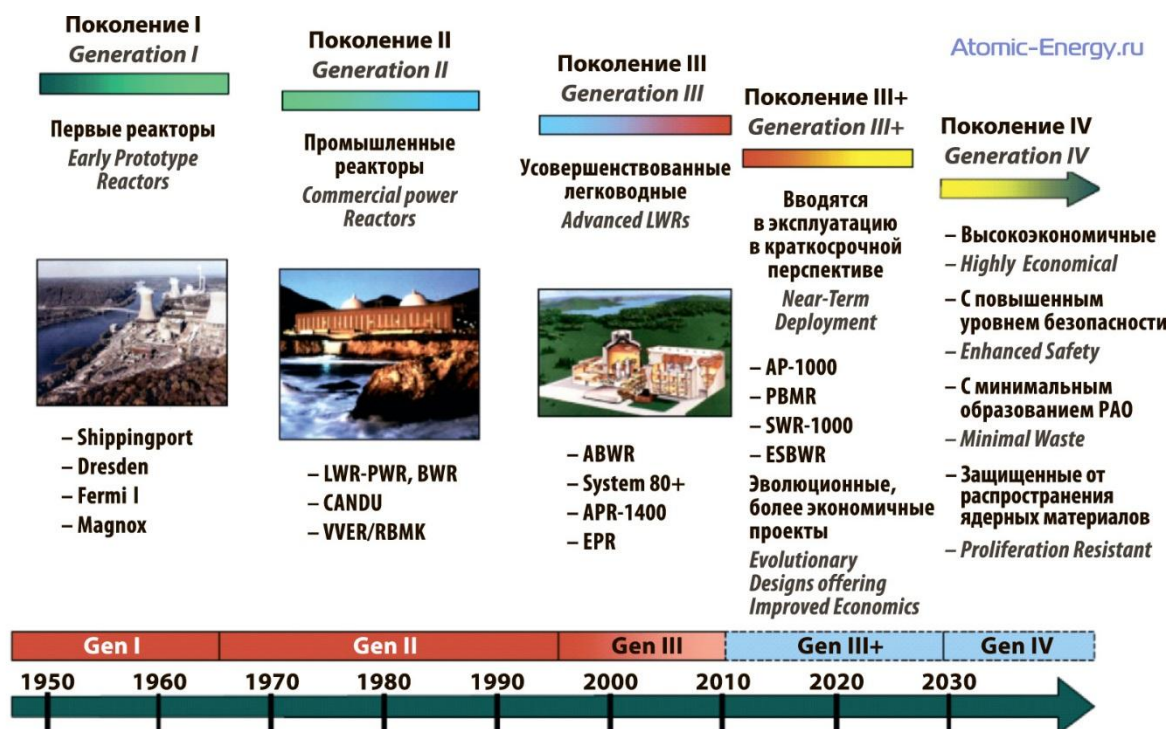
Третий аргумент – экономический.^[7] Возросшая стоимость атомных объектов наполовину связана с дополнительными вложениями в системы безопасности АЭС.^[7] Даже в этих условиях экономическая привлекательность этого вида энергетики сохраняется благодаря быстрой окупаемости, а рекордный в сравнении с другими видами теплоцентралей коэффициент использования установленных мощностей (порядка 80%) делает атомную энергетику самым надежным компонентом промышленного развития.^[7] Эффективность атомной энергетики дает возможность помимо прочего использовать отдачу для форсирования исследований в области альтернативных видов энергии.^[7]

Реактор III поколения с усовершенствованными системами обеспечения безопасности



2.1. Инновационные ядерные системы IV поколения

В течение последних нескольких десятилетий реакция ядерного деления успешно доказала важность своей роли в качестве источника энергии.^[7] Стратегия «Климат и энергия» Европейского Союза касается всех первичных источников энергии (тепловых, ядерных, возобновляемых), с акцентом на энергосбережение.^[7] Предполагается, что ядерная энергетика сохранит свою роль в снижении потребления углеводородных ресурсов, несмотря на то, что в долгосрочной перспективе (до 2100 года) можно ожидать появления доминирующих возобновляемых источников энергии.^[7]



С IV поколением ядерной технологии термин «реактор» заменяется более корректным термином «система», что включает в себя как непосредственно сам реактор, так и переработку (рециклирование) ядерного топлива.^[7] Такие новые системы должны обладать более высокими эксплуатационными показателями, чем предыдущие поколения, в области обеспечения устойчивого развития, конкурентоспособности, безопасности и надежности, а также защиты от

распространения, оправдывая использование в их отношении выражения «технологический прорыв».^[7]

Некоторые из них будут производить электроэнергию, а другие также вырабатывать тепло (температуры 400-900°C) для использования в различных промышленных целях – в нефтехимии, выработке синтетического топлива, газификации биомассы, производстве водорода из воды, стекла или цемента.^[7] Более низкие температуры (100-300°C) могут применяться для обессоливания морской воды и производства удобрений.^[7]

Некоторые системы IV поколения будут работать на нейтронах быстрого спектра.^[7] Их способность к воспроизводству делящегося материала в сочетании с передовыми технологиями деления и трансмутации открывают большие возможности.^[7] Их ядерное топливо будет устойчиво к очень высоким температурам и обеспечит удержание всех актинидов.^[7] В результате их топливный цикл будет полностью замкнутым.^[7] По этой причине новые системы особенно эффективно обеспечат устойчивое развитие, благодаря образованию минимальных объемов отходов (выжиганию всех актинидов).^[7]

2.2. Устойчивое развитие

Системы IV поколения обеспечат оптимальное использование природных ресурсов и надежность энергоснабжения.^[7] Слабой стороной существующих ядерных технологий является их ограниченная способность к использованию энергетического потенциала уранового топлива.^[7] Тепловые реакторы I и II поколений используют изотоп урана, который составляет лишь менее 1% общего количества урана, встречающегося в природе.^[7] Реакторы-размножители способны использовать значительную часть энергетического потенциала, недоступного тепловым легководящим реакторам, в результате чего из того же исходного количества урана может быть произведено в 50 раз больше энергии.^[7] Такие реакторы способны преобразовывать U_{238} в делящийся Pu_{239} даже интенсивнее, чем сами поглощают делящийся материал (свойство, называемое «размножением»)^[7]. Кроме того, они могут использовать топливо с очень низким содержанием урана, соответствующим руде.^[7]

Образование отходов будет минимальным.^[7] Недостатком открытого топливного цикла, предусматривающего захоронение отработавшего ядерного топлива без переработки, является объем, уровень радио токсичности и остаточное тепловыделение ОЯТ.^[7]

По прогнозным оценкам на ближайшие несколько десятилетий, к 2060 году накопится настолько значительное количество требующего захоронения ОЯТ, что это станет неприемлемым для человеческого общества.^[7] Эта проблема, однако, была частично решена в странах, где принято решение о промышленной переработке ОЯТ с целью извлечения плутония (замкнутый ядерный цикл с частичным рециклированием), – Франции, Великобритании, России, Японии и Индии.^[7]

Передовые технологии деления и трансмутации являются предметом многочисленных исследовательских проектов, выполняемых в рамках развития систем IV поколения.^[7] Ядерно-химические технологии позволяют выполнять

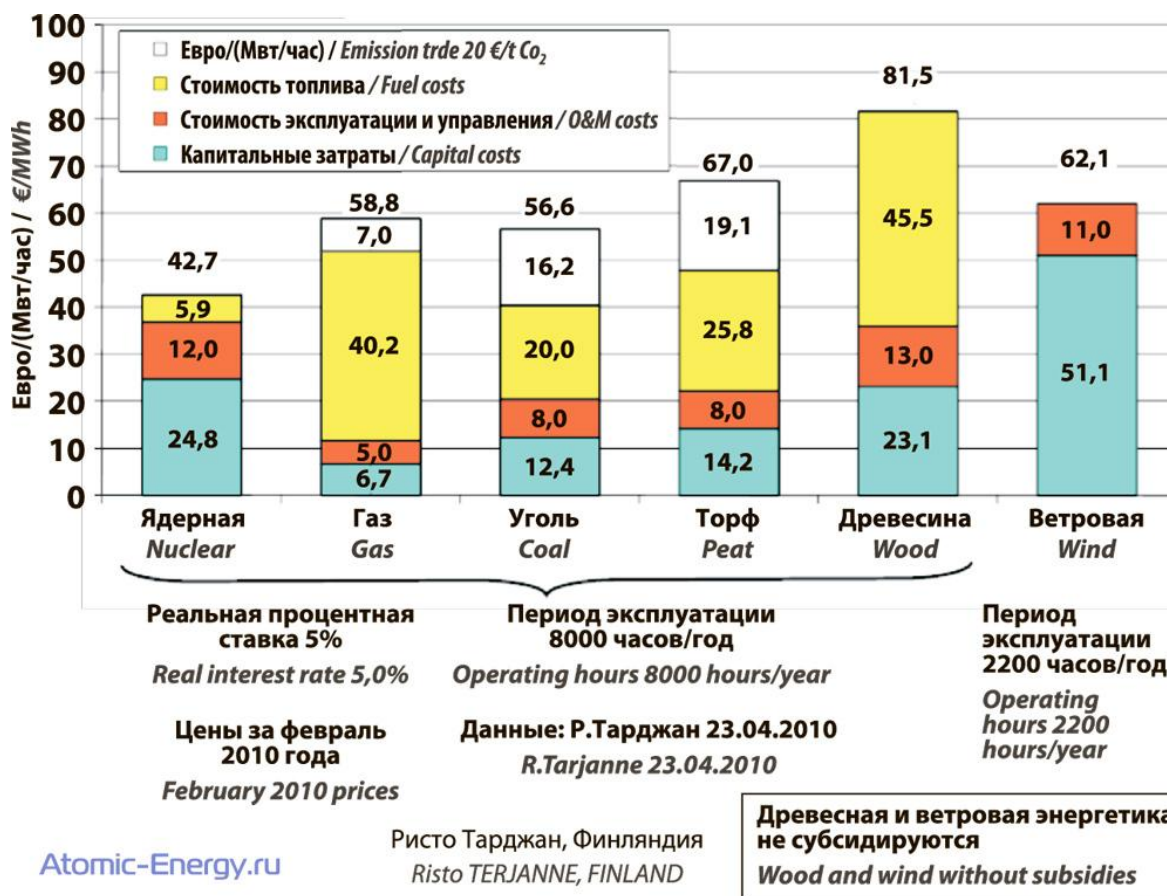
разделение отработавшего топлива на различные составляющие в зависимости от их дальнейшего использования или требований к захоронению.^[7]

22

Анализ ядерно-энергетического цикла показывает, что он производит такое же количество парниковых газов, что и гидроэлектроэнергетика, то есть ничтожно мало.^[7] В Европейском Союзе треть электроэнергии вырабатывается на АЭС, благодаря чему предотвращается образование объема CO₂, примерно равное выбросам от всех автомобилей во всех странах ЕС (около 200 млн. автомашин и 900 млн. т CO₂ ежегодно).^[7]

2.3. Конкуренентоспособность

Основная часть внешних издержек на производство электроэнергии на АЭС (например, страхование, обращение с РАО, вывод из эксплуатации) закладывается в стоимость электроэнергии, в отличие от станций, работающих на иных видах топлива.^[7] Постоянные затраты на производство ядерной энергии довольно высоки (значительные первоначальные капиталовложения), но переменные расходы небольшие ввиду низкой стоимости топлива.^[7] Цена самого урана мало влияет на итоговую стоимость электроэнергии, и общая стоимость выработки одного Мвт/ч на АЭС существенно ниже, чем на станциях других типов, особенно если принять во внимание образование CO₂.^[7]



Сравнение стоимости электроэнергии для тепловых и атомных станций, а также станций, работающих на возобновляемых источниках энергии.^[7]

Легководяные реакторы II и III поколений характеризуются сравнительно низкой температурой теплоносителя на выходе из активной зоны – около 300°C, что ограничивает их тепловой КПД (около 30% для традиционных легководяных реакторов).^[7] Ожидается, что системы IV поколения будут обладать гораздо более высоким тепловым КПД.^[7]

При применении других теплоносителей возможно достижение значительно более высоких температур: 400-600°C для CO₂, 500-700°C для жидких металлов (натрий, свинец) и 700-900°C для гелия.^[7] Напомним, что температура теплоносителя на выходе из активной зоны 900°C соответствует тепловому КПД до 44%, то есть приблизительно на треть выше, чем у традиционных легководяных реакторов.^[7]

В качестве источника энергии для низко углеродной экономики будущего – так называемого пост нефтяного общества – перспективен водород.^[7] Он может стать ключевым альтернативным источником энергии, действительно надежным и обеспечивающим максимально возможную защиту окружающей среды.^[7] Некоторые системы IV поколения могут оказаться единственными чистыми технологическими решениями, обладающими достаточной энергоемкостью для производства значительных объемов водорода из воды, с сопутствующим производством электроэнергии.^[7] На сегодняшний день существуют две такие технологии: цикл термохимического разложения воды (TCWSC, минимально необходимая температура – 750°C) и высокотемпературный электролиз водяного пара (HTES, 700°C).^[7]

2.4. Безопасность и надежность

Для систем IV поколения остается основополагающим принцип глубокоэшелонированной защиты со значительными запасами безопасности (стандарты МАГАТЭ).^[7] Он относится к детерминистическим принципам, что означает выполнение систематического анализа заданных исходных событий и их последствий (проектных аварий).^[7] Однако, как показал опыт, для более полного учета неопределенностей, которые неотъемлемо присущи инновационным системам IV поколения, подход к обоснованию их безопасности должен носить смешанный, детерминистический-вероятностный характер, обеспечивая тем самым общую гомогенность и согласованность проекта.^[7]

В современной атомной промышленности системы обеспечения безопасности, в целом, имеют активный характер, то есть их действие зависит от работы электрических и механических приводов различного оборудования, например датчиков, арматуры, насосов, аккумуляторов, теплообменников и систем внутреннего энергопотребления.^[7] Реакторы III и IV поколений оснащены более эффективными системами безопасности.^[7] В некоторых из них системы безопасности являются пассивными, что намного более эффективно, надежно и экономично.^[7]

Общепромышленная надежность взаимосвязана с безопасностью, о чем свидетельствуют показатели эффективности Всемирной ассоциации организаций, эксплуатирующих АЭС (WANO).^[7] Коэффициент использования установленной мощности в ядерной энергетике составляет 90%, что намного превышает аналогичные показатели любых других методов производства электроэнергии.^[7] Это делает ядерную энергетiku наиболее надежным способом производства электричества в любое время года.^[7]

2.5. Инновационные системы IV поколения и топливные циклы

В 2002 году форум GIF приступил к организации научного сотрудничества между заинтересованными странами-участниками в области проработки шести ядерных систем нового поколения.^[7] Были выбраны три системы, работающие на нейтронах быстрого спектра, одна на тепловых нейтронах и две системы, позволяющие работать как в быстром, так и в тепловом спектрах :

- SFR – реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем и замкнутым ядерным циклом, обеспечивающим эффективное обращение с актинидами и воспроизводство делящегося материала (Япония, США, Франция, Евратом, Южная Корея, Китай и Россия);
- LFR– реактор на быстрых нейтронах со свинцовым или свинцово-висмутовым жидкометаллическим теплоносителем и замкнутым ядерным циклом (переговоры между Евратомом и Южной Кореей; США, Япония и Россия – в качестве наблюдателей);
- GFR– реактор на быстрых нейтронах с гелиевым теплоносителем и замкнутым ядерным циклом (Франция, Евратом, Япония, Швейцария);
- VHTR– высокотемпературный реактор с графитовым замедлителем, гелиевым теплоносителем и открытым урановым топливным циклом (США, Япония, Франция, Канада, Южная Корея, Швейцария, Евратом, Китай; в 2010 году ожидается присоединение ЮАР);
- SCWR – высокотемпературный реактор с водным теплоносителем под высоким давлением, работающий выше термодинамической критической точки воды (Евратом, Канада, Япония; Южная Корея в качестве наблюдателя);
- MSR– генерирует энергию за счет реакции деления при надтепловом спектре, с циркуляцией теплоносителя и топлива в виде смеси расплавленных солей и

полным выжиганием актинидов (переговоры между Евратомом, Францией и США; Россия в качестве наблюдателя).^[71]

3.Торий.Мировые ресурсы

Однако в мире есть ресурс, мало кому известный, экологически чистый, но трудно добываемый, который человечество еще не использовало в энергетической промышленности.

Название этого ресурса – Th_{232} . Многие ученые считают, что это будущее ядерное топливо.

Торий был обнаружен в 1828 году шведским химиком Берцелиусом, который назвал его в честь скандинавского бога грома Тора. Он содержится в малых количествах в большинстве пород и почв, примерно в три раза больше, чем уран. Торий очень нерастворим, поэтому его много в песках, но не в морской воде, в отличие от урана. Торий существует в природе в одной изотопной форме - Th_{232} , который распадается очень медленно (период полураспада примерно трехкратный возраст Земли). Чистый торий представляет собой серебристо-белый металл, который сохраняет свой блеск в течение нескольких месяцев. Тем не менее, когда он загрязняется оксидом, торий медленно тускнеет в воздухе, становясь серым и в конце чернеет. При нагревании на воздухе, торий воспламеняется и горит блестяще-белым светом. Оксид тория (ThO_2) имеет одну из самых высоких точек плавления всех оксидов (3300°C) и поэтому он нашел применение в быту. Стекла, содержащие оксид тория, имеют высокий показатель преломления и длину волны дисперсии, и используется в высококачественных объективах камер. Также оксид тория относительно инертен и не окисляется дальше, в отличие от оксида урана. Он имеет более высокую теплопроводность, и меньшее тепловое расширение, чем оксид урана, а также значительно более высокую температуру плавления. Как ядерное топливо, у тория, выходные газы реализуются медленнее чем у урана. Наиболее распространенным источником тория является редкоземельный фосфатный минерал, монацит, который

содержит примерно 12% ториевого фосфата. Мировые ресурсы монацита, по оценкам, составляют около 16 млн. тонн, 12 млн. тонн находятся в тяжелых минеральных песках на южном и восточном побережье Индии.

3.1. Ядерное топливо

Торий (Th_{232}) сам по себе не делится и поэтому нет возможности использовать в тепло-нейтронном реакторе. Тем не менее, этот «плодородный» металл при поглощении нейтрона будет трансмутировать в U_{233} , который является превосходным материалом делящегося топлива. В связи с этим он похож на U_{238} (который трансформирует в Pu_{239}). Поэтому все ториевые топливные концепции требуют сначала облучить торий в реакторе, чтобы обеспечить необходимое нейтронное дозирование, для получения Pa_{233} . Протактиний, который производится, может быть получен с помощью химического деления из ториего топлива и продукта распада урана, а затем переработан в новое топливо, или уран может быть полезен "в виде топлива, особенно в расплавленных солевых реакторах. Поэтому торию, как топливу, нужен делящийся материал, для цепной реакции, и таким образом, запас избыточных нейтронов может поддерживаться. В качестве носителя подходят только делящиеся металлы U_{233} , U_{235} или Pu_{239} . Вполне возможно, но довольно сложно разработать ториевые виды топлива, которые производят больше тепла, чем U_{233} , чем они потребляют в тепловых реакторах. Производство тепла с торием требует очень хорошей экономией нейтронов (то есть, должны быть низкие потери нейтронов при паразитарном поглощении). Возможность производить делящиеся материалы в медленных нейтронных системах является уникальной особенностью ториевого топлива, по сравнению с урановым. Другой вариант использования ториего топлива в качестве «плодородной матрицы», для топлива, содержащего плутоний.

Оксид ториего и плутониевого топлива является аналогом текущего уранового топлива, но ни один новый плутоний не вырабатывается из компонента тория, в отличие от уранового вида топлива в урановые и плутониевые топлива, и поэтому уровень потребление плутония высок. Производство всех актинидов ниже, чем при

обычном топливе, а коэффициент отрицательной реактивности усиливается по сравнению с урановым и плутониевым топливом. В ториевом топливе, все деления вытекают из компонента носителя.

Конечный выход энергии из U_{233} зависит от множества параметров конструкции топлива, включающих: достижение выгорания топлива, расположением топлива, спектра энергии нейтронов и нейтронного потока (воздействие на промежуточный продукт Pa_{233} , который представляет собой поглотитель нейтронов). Выделение энергии (200 МэВ) U_{233} примерно такое же количество, как и у U_{235} . Важным принципом при проектировании систем ториевого топлива является гетерогенность расположения топлива, в котором происходит высокое деление, которое гораздо лучше для подачи избыточных нейтронов, таким образом они могут преобразовываться в делящийся U_{233} . Этот принцип применим для всех ториевых реакторов. Th_{232} расщепляется на быстрые нейтроны с энергией более 1 МэВ. В связи с этим можно было бы использовать его в реакторе на расплавах солей и других реакторов 4 поколения с урановым или плутониевым топливом для инициирования деления.

В Норвегии, Thor Energy разрабатывает и тестирует два ториевых топлива для использования в атомных электростанциях.^[8] Топливные стержни, содержащие добавки тория, а также оксидные ториевые-плутониевые топливные стержни проходили испытания в реакторе Хальден.^[8]

Компания работает в направлении получения разрешения регулирующих органов для коммерческого производства и использования ториевого топлива с 2017 по 2018, а также поставок на рынок после этого.^[8] В середине 2015 года вторая партия топливных гранул начала тестирование.^[8] Это топливо пропагандируется в качестве средства для улучшения профилей мощности в пределах промышленных реакторов.^[8]

В настоящее время норвежская компания Thor Energy тестирует свою инновационную технологию в малом масштабе.^[8] Построенный для этих целей реактор-прототип будет питать бумажную фабрику в городке Халден, Норвегия, в течение ближайших пяти лет.^[8] Если в ходе испытаний топливо покажет себя коммерчески рентабельным, мы можем увидеть радикальные изменения в ядерной энергетике мира уже к концу этого десятилетия.^[8]



Ториевое топливо^[10]

3.2. Реакторы, работающие на тории

В настоящий момент в разработке находятся, по меньшей мере, семь типов реакторов на базе тория. Два из них – тяжеловодный ядерный реактор и высокотемпературный реактор с газовым охлаждением - считаются наиболее перспективными.

Тяжеловодный реактор. Реакторы этого типа прекрасно подходят для работы с ториевым топливом. Из-за того, что скорость выделения энергии нейтронов в таком реакторе несколько выше, он лучше работает с топливом на основе U_{233} . Реакторы этого типа (особенно канадский CANDU) имеют хорошую репутацию и качественную технологию установки и обслуживания.

Газо-охлаждающий реактор. Больше предназначены для работы с ториевым топливом в виде особых частиц с примесью плутония или обогащённого урана, покрытых слоем пирографита или карбида кремния, которые помогают удерживать газообразные продукты деления. Эти частицы помещаются в графитовую матрицу, которая сохраняет стабильность даже при высоких температурах.

Кипящий реактор. Топливные сборки могут быть гибко разработаны с точки зрения стержней с различными составами (делящегося содержание), а также конструктивных особенностей, позволяющих испытать топливо более или менее умеренно (например, половина длины топливных стержней). Такая гибкость конструкции очень хорошо подходит для гетерогенных механизмов и создает хорошо оптимизированные ториевые топлива. Так можно, например, использовать торий-плутониевого топлива, разработанные с учетом для "сжигания" избыточного плутония. И, что важно, модели кипящего реактора являются хорошо изученными.

Реактор с водой под давлением. Данный тип реактора может работать на тории, хотя и с меньшей гибкостью, чем кипящий реактор. Топливо должно быть в гетерогенном

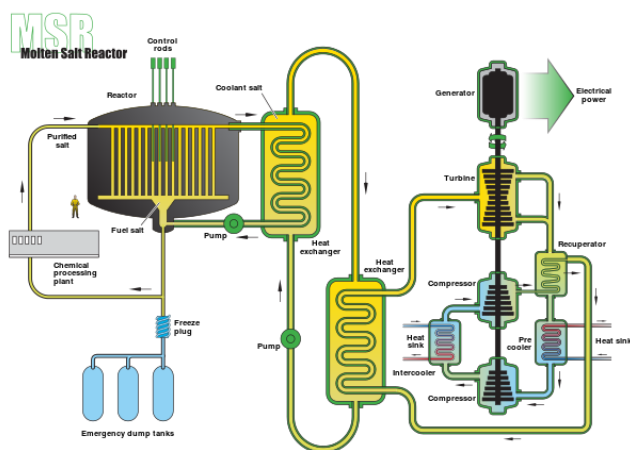
состоянии для достижения удовлетворительного выгорания. Это не представляет возможным разработать жизнеспособность ториевого топлива для данного типа реактора. Несмотря на это, его можно использовать для ранних прототипов ториевых платформ.

Реактор-размножитель для быстрых нейтронов. Торий может служить в качестве компонента топлива для реакторов, работающих с быстрым спектром нейтронов - в котором более широкий спектр тяжелых нуклидов. Однако, никакого относительного преимущества в использование тория вместо обедненного урана, в качестве плодородной матрицы. Кроме того, получается огромное количество избыточного урана, поэтому торий, в качестве топлива, имеет маленькие и не конкурентно способные шансы использования в данных реакторах.

3.3. Реактор на расплавах солей

Эти реакторы все еще находятся на стадии разработки, но, вероятно, будут очень хорошо подходить для использования тория в качестве топлива. Уникальная жидкое топливо может включать торий и уран, фториды как часть смеси соли, которые плавятся в интервале 700-800°C, и эта жидкость будет служить в качестве теплового переноса текучей среды. Жидкость циркулирует через область сердцевины, а затем через схему химической обработки, который удаляет различные продукты деления (яды) и, возможно, U_{233} . Уровень умеренности определяется количеством графита, встроенного в ядро. Некоторые реакторы будут разработаны специально для ториевого топлива для получения полезного количества U_{233} .

В 60-е годы в Окриджской национальной лаборатории (США) был разработан и построен демонстрационный реактор на расплавах солей с помощью U_{233} в качестве основного носителя. Реактор работал с 1965 по 1969 при мощностях до 7,4 МВт. Литий-бериллиевая соль работала при 600-700°C и атмосферном давлении. Программа R & D продемонстрировала возможность этой системы и отметили некоторые проблемы: коррозия и вопрос безопасности, которые необходимо решить, если построить реактор. После возобновился интерес к разработке реактора на ториевом топливе. Проекты ведутся в Китае, Японии, России, Франции и США. Следует отметить, что реактор на расплавах солей является одним из шести конструктивных реакторов "4 Поколения", отобранных для дальнейшего развития.



Реактор на расплавах солей^[14]

3.4. Реактор, инициируемый ускорителем

Подкритический реактор является нетрадиционной концепцией ядерного деления энергии, которая является потенциально подходящей для тория. Нейтроны расщепления, которые получаются при высокой энергии протонов. Эти нейтроны направлены на область, содержащую ториевое топливо, например, торий-плутоний, который вступает в реакцию с выделением тепла, как и в обычном реакторе. Система остается подкритичной, т.е. не в состоянии поддерживать цепную реакцию без пучка протонов. Трудность состоит в надежном ускорителе высокой энергии, а также с экономией, из-за высокого энергопотребления. Основным выводом из исследования ториевого топлива на сегодняшний день является то, что топливо не является экономически жизнеспособным для использования низкообогащенного урана, из-за делящегося ускорителя с ториевым топливом. Что касается значимости пролиферации, торий, на основе энергетических реакторов, в качестве топлива будет плохим источником для делящегося материала, используемого при незаконном изготовлении взрывного устройства. U_{233} , содержащийся в отработанном топливе содержит U_{232} , который распадается с получением очень радиоактивных дочерних нуклидов и это создает сильное поле гамма-излучения. Это придает устойчивость к нераспространению, создавая значительные проблемы обработки и значительно повышая способность охранять этот ресурс.

3.5.Ториевое топливо в качестве электроэнергии

Уже несколько раз проходили демонстрации, по использованию ториевого топлива, в качестве производства электричества в разных типах реактора.

В Германии в 300 МгВт Ториевом высоко температурном реакторе в Хамм Уентропе с 1983 по 1989 использовали топливо, содержащие торий и обогащённый уран, который был закрыт по техническим причинам. Большеполовины 674,000 гальки, содержала топливо с торием и ураном (остальная часть состояла из графитного замедлителя и поглотителя нейтронов). Они непрерывно перемещались через реактор, пока он работал, и в среднем каждая топливная галька прошла шесть раз через ядро.

В 40 МгВт Пич-Боттоме в газо-охлаждающем реакторе в США была демонстрация тория, в качестве топлива, который работал с 1967 по 1974. Там использовали торий-урановое топливо в виде микросфер смешанного карбида тория и урана, покрытых пироуглеродом. Они были встроены в кольцевых сегментах графита (не галька). Этот реактор произвел 33 млрд.квтч в течение 1349 дней в эквиваленте полной мощности с коэффициентом 74%.

Также проходили испытания на электростанциях Шиппингпорт в С.Ш.А и Индии.

3.6. Разработка ториевого топливного цикла

Ториевые топлива предлагают привлекательные возможности, в том числе более низкие уровни образования отходов, меньше трансурановых элементов в этих отходах, а также предоставление варианта диверсификации для поставок ядерного топлива. Кроме того, использование тория в большинстве типов реакторов приводит к дополнительным запасам прочности. Несмотря на эти заслуги, коммерциализация ториевого топлива сталкивается с некоторыми трудностями, с экономической точки зрения построение требует провести работу по развитию. Много испытаний, анализа, лицензирование и квалификации работ требуется, до того, как ториевое топливо может вступить в эксплуатацию. Это дорого и невозможно, без четкого экономического обоснования и государственной поддержки. Кроме того, на данный момент, запасов урана в изобилии, он дешевле и образует лишь небольшую часть стоимости выработки электроэнергии на АЭС, так что нет никаких реальных стимулов для инвестиций в новый вид топлива, который мог бы заменить уран.

Другие препятствия на пути развития ториевого топливного цикла - более высокая стоимость изготовления топлива, а стоимость переработки, чтобы обеспечить материал носителя, делящийся плутоний. Высокая стоимость изготовления топлива (твердого топлива) является частично обусловлено высоким уровнем радиоактивности, которая накапливается в U_{233} , химически выделен из облученного ториевого топлива. U_{233} всегда содержит U_{232} , который имеет 69-летней полураспад в дочерних нуклидов, таких как Tl_{208} , которые являются гамма-излучателями высоких энергии. Хотя это и придает устойчивость к пролиферации топливного

цикла, U_{233} трудно обрабатывать и легко обнаружить, что приводит к увеличению затрат. Схожие проблемы утилизации тория из-за высокой радиоактивности Th_{228} (альфа-излучатель с двухлетним периодом полураспада). Некоторые из этих проблем будут преодолены в реакторах на расплавленной соли, и топливного цикла конструкций, но не твердого топлива. В частности, в реакторе на расплавленной соли, равновесный цикл топлива, как ожидается, имеют относительно низкую радиотоксичность, будущие продукты деления недолговечны. Они постоянно удаляются вторичной переработкой, хотя это намного сложнее, чем для цикла уран-плутониевого топлива.

Тем не менее, ториевый топливный цикл предлагает преимущества энергетической безопасности в долгосрочной перспективе. Это важная и потенциально жизнеспособная технология, которая способна внести свой вклад в создание надежных, долгосрочных сценариев развития ядерной энергетики.

3.7. Недостатки тория

Есть проблема минорных актиноидов, когда в процессе работы ядерного реактора из 95–97 процентов U_{238} и 3–5 процентов U_{235} , в процессе поглощения нейтронами возникают различные «нехорошие» вещества, называемые минорными актиноидами.^[9] В эту группу входят нептуний Np_{-237} , а также изотопы америция $Am_{241, 243}$ и кюрия $Cm_{242, 244, 245}$.^[9] Они все радиоактивны, являясь мощными гамма-излучателями.^[9] Правда, в «свеженьком» ОЯТ их окажется вовсе немного: на тонну – лишь несколько килограммов.^[9] А ведь еще более активных продуктов деления, вроде известного Cs_{137} , на тонну образуются десятки килограммов.^[9]

Все дело в периоде полураспада.^[9] Длиннейший период полураспада продуктов деления у Cs_{137} .^[9] Составляет он около трех десятков лет.^[9] За три сотни лет его активность станет меньше в тысячу раз, за девять сотен – в миллиард.^[9] А значит, за исторически вполне обозримый период времени мы можем прекратить беспокоиться о коррозии ОЯТ.^[9] Для минорных актиноидов периоды полураспада достигают тысячелетий, что означает удлинение сроков их хранения с веков до десятков тысяч лет.^[9] Подобный временной отрезок вообразить довольно сложно.^[9] Но вот вполне реально представить, что в случае интенсивной деятельности атомной энергетики уже через несколько тысячелетий ОЯТ заполнит весьма значительную территорию, при этом популярнейшей профессией окажется «охранник хранилища ОЯТ».^[9]

История изменится, если заменить имеющийся ныне цикл с однократным применением топлива на цикл замкнутый, нарабатывая ядерное топливо из Th_{232} или U_{238} и сжигая его в реакторе.^[9] При этом, понятно, резко уменьшится объем ОЯТ, хотя начнет значительно возрастать количество минорных актиноидов.^[9] Проблема уничтожения в ядерных реакторах при помощи расщепления или трансмутации минорных актиноидов берет начало еще с 70 годов прошлого века, одной из самых серьезных на пути к развертыванию ЗЯТЦ.^[9] В этот момент «на коне» оказывается Th_{232} .^[9] Минорные актиноиды не будут образовываться в него ЯТЦ.^[9] Выходит, отпадает проблема с «вечным» хранением ОЯТ.^[9]

Не будет и проблем в обращении со столь неприятными и непростыми субстанциями во время переработки уранового ОЯТ.^[9] В связи с этим, у тория получается серьезное преимущество, именно на нем ЗЯТЦ может быть в чем-то проще.^[9]

Концентрация тория очень слаба в земной коре, и найти его месторождения весьма непросто.^[9] Поэтому сам торий не добывают, а извлекают его при добыче редкоземельных минералов (монацит, торит и торионит).^[9] Торий встречается в гранитах, но чаще всего попадает в составе монацитовых россыпей.^[9] В обычной жизни это тот самый черный песок на пляжах Индии и Бразилии.^[9]

3.8.Преимущества ториевой энергетики

Исследования тория в качестве использования ядерного топлива проводились еще в 1970-е гг., но были прекращены на фоне «холодной войны», когда мир отдал предпочтение урану, поскольку в отличие от тория его можно использовать для создания ядерного оружия.^[10]

Преимущества тория перед ураном:

- теплопроводность и точка плавления тория намного выше, а это значит, что он может работать при более низкой и безопасной температуре;
- запасы тория превосходят запасы урана в 3-4 раза;
- период полураспада тория меньше, чем у урана;
- отходы расщепления тория не могут быть обогащены и использованы для создания ядерного оружия, кроме того, они более стабильны на протяжении всего периода своего распада;
- 450 гр. тория способны произвести столько же энергии, как 136 кг урана или 1587 тонн угля без вреда для окружающей среды.^[10]

В результате работы ториевого реактора не производится плутоний, который используют для создания ядерного оружия, а ядерные отходы имеют более короткий

период полураспада.^[10] Это лишь означает, что торий намного безопаснее урана и в целом позиционируется как более экологичное топливо.^[10]

Идеей использования ториевого топлива интересуются многие страны (Индия, Канада, Китай).^[10] Развитие ториевой энергетики безопаснее и перспективнее, но с экономической точки зрения на сегодняшний день торий проигрывает урану.^[10] Торий сложно добывать, извлекать и использовать, тогда, как процесс работы с ураном уже налажен.^[10] Энтузиасты атомной энергетики активно продвигают торий как более эффективную и безопасную альтернативу урану.^[10] Но о коммерческом использовании ториевого топлива в ядерной энергетике можно будет говорить только после окончания необходимых испытаний.^[10]

4. Атомная энергетика в Эстонии

На данный момент, вице-канцлер Эйнар Кисель утверждает, что атомная энергетика в Эстонии может появиться не раньше 2020 года.^[12]

Стратегическая цель Эстонии, по словам министра экономики Юхана Партса, состоит в том, чтобы разнообразить энергетический портфель, и атомная энергия является одной из самых серьезных возможностей для этого.^[11] Возможностью по развитию ядерной энергетики для Эстонии является участие Литвы или Финляндии, или строительство собственной АЭС в Эстонии.^[11]

Возможности развития атомной энергетики в Эстонии взвешиваются в первую очередь для того, чтобы на фоне растущего потребления электричества увеличить производственные мощности.^[11] На данный момент в Эстонии электричество производят в основном из сланца, но тот больше подходит для производства масла, и, исходя из этого необходимо найти другие источники электричества.^[11] Так же сланец является большим источником CO₂.^[11]

На данный момент, невозможно предположить экономическую часть АЭС, но исходя из слов Киселя, цена на электроэнергию возрастет.^[12]

Предполагаемое топливо будет уран.^[12]

К сожалению, трудно прогнозировать атомную энергетику в Эстонии, так как она требует больших капиталовложений и одобрения Евро Союза.

Заключение

Сейчас атомная энергетика - важная отрасль мировой энергетики, которая появилась несколько десятков лет назад и вносит большой вклад в глобальное производство электрической энергии. Производство электроэнергии, по сравнению с другими электростанциями, значительно выше, что делает данную отрасль фаворитом среди конкурентов. Главное преимущество АЭС - отсутствие выбросов аэрозолей и парниковых газов в атмосферу.

В будущем планируется развивать атомную энергетику. Уже проходят испытания реакторы-системы 4 поколения, которые возможно в скором времени будут работать на многих АЭС. Данное развитие требуется потому, что ресурсы, на которых сейчас работают реакторы, рано или поздно закончатся. Во-вторых, АЭС сильно загрязняют природу. И в третьих, экономический аспект дает о себе знать. Атомные электростанции очень дорогие в обслуживании.

Также в скором времени планируется замена ядерного топлива. На данный момент используют уран и плутоний, и проходит испытание торий. В качестве топлива торий, возможно, будет использоваться, ведь он имеет хорошие преимущества по сравнению с ураном. Но торий имеет также недостатки, и поэтому остается только ждать когда, данный химический элемент пройдет испытания.

В Эстонии, возможно, тоже, когда-нибудь появиться АЭС. Разговоры на эту тему уже ведутся, это все зависит, одобряет ли Евро Союз или нет. Ведь чтобы построить атомную электростанцию в Эстонии, надо не мало вложений, а также, чтобы она соответствовала нормам и стандартам.

Summary

This work refers to the nuclear power today and future development prospects, how they are working, their structure. Why we must develop this structure.

One of the significant prospect it is thorium fuel. This new fuel has good world stocks. Thorium is very suitable as nuclear fuel. There are seven types of reactor into which thorium can be introduced as a nuclear fuel: heavy water reactors, high-temperature gas-cooled reactors, boiling (light) water reactors, pressurised (light) water reactors, fast neutron reactors, molten salt reactors and accelerator driven reactors. There have been several significant demonstrations of the use of thorium-based fuels to generate electricity in several reactor types. Many of these early trials were able to use high-enriched uranium (HEU) as the fissile 'driver' component, and this would not be considered today.

Of course thorium fuel has own advantages and disadvantages. Research into the use of thorium as a nuclear fuel has been taking place for over 40 years, though with much less intensity than that for uranium or uranium-plutonium fuels. Basic development work has been conducted in Germany, India, Canada, Japan, China, Netherlands, Belgium, Norway, Russia, Brazil, the UK & the USA.

In our country, in Estonia, further future we have possibility to build our nuclear plant, where we , may be , will use thorium fuel.

Списокиспользуемойлитературыи электронных страниц

- [1]<http://postnauka.ru/faq/14277> (02.03.16)
- [2] http://ru.wikipedia.org/wiki/ядерная_энергетика(02.03.16)
- [3] http://ru.wiki2.org/wiki/ядерная_энергетика (02.03.16)
- [4] http://chernobyl-grad.at.ua/load/svedeniya/sved/jadernyj_reaktor/21-1-0-79 (02.03.16)
- [5] http://newikis.com/ru/wiki/атомная_энергетика (02.03.16)
- [6] http://ru.enc.tfode.com/атомная_энергетика (02.03.16)
- [7]<http://www.atomic-energy.ru/technology/34307> (10.03.16)
- [8] <http://gearmix.ru/archives/3654> (15.04.16)
- [9] <http://www.mirprognozov.ru/prognosis/science/toriy-ili-uran-de> (15.04.16)
- [10] <http://rentenergo.ru/news/novinki-na-ryinke/toriy-novoe-toplivo-dlya-yadernoy-energetiki> (22.04.16)

- [11] <http://rus.delfi.ee/daily/estonia/zakonoproekt-ob-atomnoj-energetike-gotov?id=42082361> (22.04.16)
- [12] http://62.65.41.162/publications/infopress/newssilla.php?ELEMENT_ID=8196 (30.04.16)
- [13] <http://diplomshop.ru/works.php?item=435482> (05.05.16)
- [14] <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/78513> (28.05.16)
- [15] <http://nature.web.ru/db/msg.html?mid=1183867&uri=42.html> (28.05.16)
- <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/thorium.aspx> (06.05.16)

Paist, A., Kruus, R. (2011). Tuumareaktorid. TTÜ kirjastus Tallinn

Eesti keelne kokkuvõte

Tänapäeval on paljud arusaanud, et tuumaenergia on energiaallikas, mis avab täiesti uusi võimalusi ja väljakutseid inimkonnale arengule. Juba 60 aastat tagasi kirjutas Enrico Fermi et tuumaenergia on uus energiaallikas, mis õigel kasutamisel on praktiliselt puhas ja ammendamatu energiaallikas.

Tänapäeval kasutatakse tuumaenergia saamiseks plutoonium-239 või uraan-235 ahelreaktsioone. Ahelreaktsiooni käigus pommitatakse suure massiarvuga tuumi neutronitega. Selle tulemusena tekivad erineva massiga osad – kildtuumad, tekkivad uued isotoobid ja eraldub neutroneid. Neutroneid ja kildtuumad omavad suurt kineetilist energiat. Kildtuumade kokkupõrgetel teiste aatomitega kineetiline energia muundub momentaalselt soojuseks .

Tuumkütusetsükkel on jada mis algab tuumkütuse kaevandamisest, konversioonist, rikastamisest, tuumkütuse tootmisest ning lõpeb radioaktiivete jäätmete käitlemisega, sõltuvalt tuumkütusest ja konkreetsetest tingimustest.

Ekspluatatsiooni käigus reaktorite tehnilisel teenindamisel eemaldatakse madala radioaktiivsusega jäätmed. Reaktori tööea ammendumisel reaktor seisatatakse,

lammutamisega kaasneb desaktiveerimine, radioaktiivsete jäätmete töötlemine ja enne lõplikku hoiustamist nende mahu ning ohtlikkuse vähendamine.

2014. aastal moodustas tuumaenergia ca 2,6% kogu inimkonna tarbitavast energiast. Tuumaenergeetikasektor on oluline nendes tööstusriikides, kui ei ole piisavalt looduslikke energiaressursse - Prantsusmaal, Ukrainas, Belgias, Soomes, Rootsis, Bulgaarias, Šveitsis ja Jaapanis.

Umbes pool maailma elektrienergia tootmise potentsiaalset tuumaelektrijaamades on kahes riigis - USA ja Prantsusmaa. USA tuumaelektrijaamad toodavad ainult 1/8 kodumaisest elektrist, kuid see moodustab umbes 20% maailma tuumajaamade elektritoodangust. Tuumajaamades toodetud elektri osakaal kogu elektri toodangust oli suurim Prantsusmaal ca 74% .

46

Tuumaenergia üle käib elav arutelu. Toetajad ja vastased on eriarvamustel nii turvalisuse, töökindluse kui ka majanduslik efektiivsuse hindamisel. Ohtlikkus on seotud radioaktiivsete jäätmete käitlemisega, avariidega millega kaasnevad ökoloogilised , samuti võivad tuumajaamad sattuda terroristide rünnaku objektideks. "Kahene kasutus": tuumajaamadest võib tuumkütus sattuda väärkasutusse – tuumarelvade tootmisse seepärast kaasneb sellega pidev avalikkuse mure, poliitilised intriigid ja ka sõjaline tegevus.

2005. aastal andis Soome valitsus loa Olkiluoto 3 tuumaelektrijaama ehitamiseks. Arvati, et jaam viiakse eksploatatsiooni 2010. aastal. 2015 eeldati, et reaktorit ei käivitata enne 2018 aastat. Jaama ehituse algmaksumus oli hinnanguliselt 3 miljardit eurot. 2015 aastaks oli see summa kasvanud juba 2 miljardi euro võrra. Selle tulemusena tühistas Soome planeeritud Olkiluoto 4 ehituse.

Tänaseks on paljud uute reaktorite projektid tühistatud või külmutatud.

Väljendatakse kahtlust tuumaenergiat kasumlikkuses. Tingituna üha rangematest ohutusnõuetest on elektrienergia tootmine tuumaelektrijaamades üha kallineb samal ajal kui elektri hind muid energiaallikaid kasutades sageli alaneb.

Üks probleem tuumaenergia korral on ka soojusreostus. Mõnede spetsialistide arvates, viivad tuumajaamad "ühiku toodetud elektrienergia kohta " keskkonda rohkem soojust kui sama võimsusega soojuselektrijaamad.

Tuumaenergia tulevikus

Kolm tegurid mis muudavad tuumaenergeetika kasutamise vältimatuks:

- Esiteks, taastumatute süsivesinike varude vähenemine
- Teiseks, keskkonna saastamine dikteerib vajadust kasutada süsiniku vaba energiat.
- Kolmas argument - majanduslik. Suurenenud kulud tuumarajatistele on pooles ulatuses seotud täiendavate investeeringutega tuumjulgeolekusse.

Viimastel aastakümnetel on tuumade lõhustumine edukalt tõestanud oma rolli olulisust energiaallikana. Strateegia "kliima- ja energiapoliitika" Euroopa Liidu kehtib kõigi esmaste energiaallikate (soojus, tuumaenergia, taastuvenergia), rõhuasetusega energiasäästul.

Võib oletada, et tuumaenergia on säilitab oma positsiooni seoses fossiilsete kütuste tarbimise vähenemisega vaatamata sellele, et pikemas perspektiivis (kuni 2100. aastani) on valitsev taastuv energia.

IV põlvkonna tuumatehnoloogia puhul mõiste "reaktor" asendatakse täpsema terminiga "süsteem", mis hõlmab nii reaktorit kui ka tuumakütuse ümbertöötlemist (ringlusse võttu). Need uued süsteemid peaksid olema kõrgemate eksploatatsiooniliste näitajatega kui eelmine põlvkond, neid iseloomustab jätkusuutlikkus, konkurentsivõime, reaktorite töö turvalisus, usaldusväärsus, tuumamaterjalide diversiooni- ja terrorirünnakukindlus ning sageli kasutakse nende puhul väljendit "tehnoloogiline läbimurre".

Neid reaktoreid kasutatakse nii elektri kui ka soojuse tootmiseks (temperatuuriga 400-900 ° C). Viimaseid kasutatakse tööstuslikuks otstarbeks – naftakeemiatööstuses, sünteetiliste kütuste tootmisel, biomassi gaasistamisel, veest vesiniku tootmisel, klaasi või tsementi

tööstuses. Madalama temperatuuriga soojust (100-300 ° C) kasutatakse mere vee magestamisel ja väetiste tootmisel.

Mõned IV põlvkonna reaktorisüsteemid töötavad kiiretel neutronitel. Nende võime taastoota lõhustuvat materjali koos täiustatud lõhustumise ja transmutatsiooni tehnoloogiatega pakuvad suuri võimalusi. Nende reaktorite tuumkütus on püsiv ka väga kõrgetel temperatuuridel ja säilitab kõik aktiniidid. Selle tulemusena tuumkütusetsükkel on täiesti suletud. Seega on uued süsteemid eriti efektiivsed ja just tänu jäätmete minimaalsele tekkele (nn aktiniidide täielik väljapõletamine).

IV põlvkonna süsteemid tagavad optimaalse loodusvarade kasutamise ja usaldusväärse energiavarustuse.

Olemasoleva tuumatehnoloogia puuduseks on olnud piiratud võimalused uraani kui tuumkütuse potentsiaali täielikul ärakasutamisel.

Uute tehnoloogiate puhul on tuumajäätme teke viidud miinimumini. Avatud tuumatsükli puuduseks oligi suure radioaktiivsusega jäätmete käitlemine mida tuli jahutada betoonist basseinides veekihi all, jääksoojuse eraldamiseks enne nende lõppladustamist.

Prognooside kohaselt koguneb järgmiste aastakümnete jooksul täpsemalt juba 2060. aastaks nii suur hulk kasutatud tuumkütuse jäätmeid, et see on vastuvõetamatu inimühiskonnale. See probleem on lahendatud sellistes riikides nagu Prantsusmaa, Suurbritannia, Venemaa, Jaapani ja India, kus kasutatakse seguoksiid kütust plutooniumist ja väikeaktiniididest koos uraaniga.

Eesrindlike tehnoloogiate rakendamine lõhustumise ja transmutatsioonide osas on paljude uurimisprojektide sisuks IV põlvkonna reaktorisüsteemide väljaarendamisel. Keemilised tuumatehnoloogiad võimaldavad rektorist eemaldatud tuumkütuse jagamist erinevateks osadeks sõltuvalt nende edasise kasutamise või kõrvaldamise nõuetest.

IV põlvkonna reaktorisüsteemide on põhialuseks süvakaitse koos ohutusvaruga. See kuulub determineeritud põhimõtete valdkonda, mis tähendab süstemaatilist algsündmuste kui ka tagajärgede analüüsi (võimalike avariide ettenägemine). Suuresti põhineb see nn

passiivse ohutussüsteemi ideel, mis põhineb loomulikel füüsikalistel nähtustel, gravitatsioon, rõhkude vahe jne.

Tänapäeva tuumajaamade turvasüsteemid üldiselt on aktiivsed, st nende tegevus sõltub mitmesuguste seadmete elektrilistest ja mehaanilistest ajamitest milledeks on sensorid, klapid, pumbad, akud, soojusvahetid ja sisemine elektrivarustussüsteem.

Üldine tööstusseadmete töö usaldusväärsus on seotud turvalisusega, mida tõendavad efektiivsuse näitajad tuumajaamade eksploatatsioonil sellise organisatsiooni nagu World Association of Nuclear Operators (WANO) poolt. Installeeritud võimsuse kasutamise on tuumajaamades ca 90% ületades mistahes muu meetodid elektri tootmiseks. See muudab tuumaenergia kõige kindlamaks viisiks toota elektrit sõltumata aasta ajast.

Edasine tuumaenergeetika areng eeldab teadmiste ja oskuste säilitamist ning arendamist et pakkuda kvalifitseeritud tööjõudu nii uurimiskeskustele kui ka tuumarajatistele.

49

Sellele aitavad kaasa Euratom koolitusprogrammid tutvustades tuumaenergeetika arenguid ja tehnoloogilist innovatsiooni. Euratomi koolitustegevuse eesmärgiks on tõsta kvalifikatsiooni taset tuumatööstuse töötajatele, lõppeesmärgiga tõsta tuumaohutuskultuuri ELis ja mujal.

Erilist tähelepanu pööratakse teadmiste ja oskuste pidevale täiendamisele nn elukestev õpe. Strateegia koolituses on Euratom seadnud endale kolm põhieesmärki:

- Analüüs ühiskonna vajadusi ja tööstuse valdkonna üldkultuuri tuumaohutuse seisukohast
- Välja töötada ühine arusaam nende nõuete osas Euroopa Liidus
- Luua ühised vahendid nende vajaduste rahuldamiseks ja nägemus (ECVET)

Mittetulundusühing "Europe Nuclear Education Network» (Euroopa Tuuma Hariduse Võrgustik), ENEN) on loodud (2003), et tagada kõrgeima kvaliteediga tuuma haridus ja koolitus kõigis Euroopa Liidu liikmesriikides. Juunis 2010 oli ENENis liikmeid 56 riigist (lisaks 17 ELi liikmesriiki - Šveits, Lõuna-Aafrika, Venemaa, Ukraina ja Jaapan).

Toorium.

Kuid maailmas on olemas ressurs, vähetuntud, ökoloogiliselt puhas, kuid see on raskesti kättesaadav, mida inimkond ei ole veel kasutanud energiatööstuses

Selle ressursi nimi on - toorium 232. Paljud teadlased usuvad, et see on tuleviku tuumakütus.

Tooriumi avastas 1828 Rootsi keemik Berzelius, kes nimetas selle skandinaavia äikese jumala auks tooriumiks. Tooriumit on leitud väikestes kogustes pinnases ja kivimites, umbes kolm korda rohkem kui uraani. Toorium ei ole lahustuv, seetõttu võib teda leida liivades, kuid mitte merevees erinevalt uraanist. Toorium esineb looduses ainult ühe isotoobi kujul - Th-232, mis laguneb, väga aeglaselt. Puhas toorium on hõbevalge metall, mis säilitab oma läike mitu kuud. Oksüdeerumisel toorium aeglaselt tuhmub õhus, muutub halliks ja lõpuks mustaks. Kui teda aga kuumutada õhukäes, siis ta süttib ja põleb erevalge leegiga. Tooriumoksiid (ThO_2) on üks kõrgema sulamistemperatuuriga okside (3300°C) ja seetõttu on ta leidnud rakenduse olmes.

50

Prillid, mis sisaldavad tooriumi oksidi on kõrge murdumisnäitajaga ja lainepikkuse dispersiooniga ja seda kasutatakse kõrge kvaliteediga kaamerate läätsedes. Tooriumoksiid on ka suhteliselt inertne ja ei oksüdeeru edasi erinevalt uraanoksiidist. Omab üsna kõrget soojusjuhtivust ja väikest soojuspaisumist võrreldes uraanoksiidiga ning oluliselt kõrgemat sulamistemperatuuri.

Tuumakütuse tooriumi puhul eralduvad heitgaasid aeglasemalt uraanil. Kõige levinum tooriumi allikas on fosfaat mineraal monatsiit (monatsiitliivad), mis sisaldab umbes 12% tooriumi fosfaate. Maailma tooriumivarusid monatsiit mineraalidena on hinnanguliselt umbes 16 miljonit tonni, 12 miljonit tonni sellest on raskete mineraalsete liivadena India lõuna- ja idarannikul.

Toorium (Th-232) iseenesest ei lõhustu ja seetõttu ei ole tooriumit kasutada soojuslikel neutronitel töötavas reaktoris. Neutronvoo toimel muutub toorium uraan-233ks (U-233), mis on teine kergesti lõhustuv uraaniisotoop, kuid mida ei leidu looduslikus uraanis. U-233 on sarnane U-238ga (mis transformeerub plutoonium-239). Seega on kõik toorium kütusega seonduv nõuab tooriumi esmast töötlemist neutronvooga reaktoris Protaktiinium-

233 saamiseks. Protaktiinium, mis on sellisel teel on toodetud on kasutatav kütusena sulasoola reaktorites. Toorium kütusena, vajab lõhustuvate materjalide ahelreaktsiooni ja liigseid neutroneid on võimalik säilitada. Kandjatena sobivad lõhustuvad metallid nagu uraan-233, uraan-235 või plutoonium-239. Võimalik, kuid on raske on arendada toorium kütused, mis toodaksid rohkem soojust kui uraan-233. Tooriumiga soojuse tootmine nõuab väga head neutronite majandust. Võimalus toota lõhustuvat materjali aeglase neutronite süsteemis on unikaalne toorium omadus võrreldes uraaniga. Teine võimalus on kasutada tooriumit kui "viljakat elementi", segukütuse tootmiseks mis sisaldab plutooniumi.

Tooriumoksiidi ja plutooniumi segukütus on analoogne tänapäeval kasutatava uraaniga, kuid plutooniumit tooriumist ei toodeta, erinevalt uraanist kus plutooniumi põhiaineks on teisendumine U-238st.

Norras arendab Thor Energia ja testib kahte toorium kütuse kasutamist tuumaelektrijaamades. Kütus vardaid, mis sisaldavad tooriumi lisandid ja oksiide toorium-plutooniumi kütusevarrastena testiti Haldeni reaktoris.

Ettevõtte töötab selles suunas, et saada regulaatori heakskiitu alustamiseks kaubanduslikku tootmist ja tooriumi kasutamist kütusena 2017-2018, aga ka turu varustamiseks kütusega pärast seda. 2015. aasta keskel alustati teise partii pelletite testimisega. Seda kütust propageeritakse vahendina, mis aitab parandada võimsus profiile kommertsreaktorites.

Praegu Norra kompanii Thor Energia katsetab oma uuendusliku tehnoloogiat väikestes kogustes. Selleks otstarbeks ehitatud prototüüp-reaktor varustab energiaga Haldeni linna paberivabrikut, Norras, järgmise viie aasta jooksul. Kui katsetuste käigus osutub kütus majanduslikult tasuvaks näeme me radikaalseid muutusi tuumaenergeetikas arengus juba käesoleva aastakümne lõpuks.

Käesoleval ajal töötatakse maailmas välja vähemalt seitse tüüpi reaktorit, mis töötaksid tooriumil. Kahte neist – raskevee reaktorit ja kõrge temperatuuriga gaasreaktorit - peetakse kõige lootustandvamateks.

Raskeveereaktorid. Raskeveereaktorid sobivad hästi toorium kasutamiseks. Tulenevalt asjaolust, et neutronite energia vabanemise kiirust selles reaktoris on mõnevõrra kõrgem, töötab see paremini kui kütusena kasutada uraan-233. Seda tüüpi reaktorid (eriti Kanada väljatöötatud CANDU-reaktor) on hea mainega ja kõrge kvaliteediga nii paigalduse ja hoolduse osas. Reaktoritel on kaks üksteisest sõltumatut kiire seiskamise süsteemi. Kumbki süsteem on suuteline vähendada reaktoris eralduvat soojust kahe sekundiga 100% 10%le. Ülejäänud soojus eraldatakse tavalise soojuseemaldus avariisüsteemiga.

Gaasjahutusega reaktor. Gaasjahutusega reaktorid on gaassoojuskandjaga grafiitaeglustiga reaktorid. Heeliumjahutusega reaktor töötab temperatuuri 850 oC ja sobib elektri tootmiseks ning vesiniku termokeemiliseks tootmiseks. Heelium juhitakse gaasiturbiini, mis töötab Braytoni ringprotsessil. Tuumkütuseks sobivad toorium kütused ja mitmesugused lõhustuvad või fertiilsed materjalid keraamiliste komposiitidena. Südamik koostatakse prisma, plaadi või vardakujulistest kütusekoostudest. Kasutatud tuumkütus töötab taaskasutamiseks ümber kohapeal.

52

Keevaveereaktor. Vesi keeb üldjuhul rõhul ca 75 baari ja 12-15 % kogu reaktori südamiku veest on auru kujul. Aurugeneraatori puudumine lihtsustab oluliselt reaktori skeemi. Kütuse koostusid saab paindlikult kujundada paindlik konstruktsioon sobib hästi töötuim kütusele. Võib kasutada segukütust tooriumi-plutoonium et välja põletada liigne plutoonium.

Surveveereaktor. Seda tüüpi reaktori ei sobi nii hästi kui keevaveereaktor toorium kütuse kasutamiseks. Kütus peab olema heterogeensel kujul ainult sel juhul saavutatakse rahuldav väljapõlemine.

Sulasoolareaktor. See reaktoritüüp töötab ülesoojusliku kiirusega neutronitel. Naatrium- ja tsirkooniumfluoriidide segust soojuskandjas lahustatud uraankütus ringleb läbi grafiidist südamikukanalite, mille tulemusena toimub neutronite mõningane aeglustumine.

Soojuskandja toimib primaarkontuuris väga madalal rõhul ja kõrgel temperatuuril (700-800°C) ning kannab soojuse vahepealse soojusvaheti kaudu üle sekundaarkontuurile. Alles järgmises soojusvahetis saadakse aur elektritootmiseks ja on võimalik ka vesinikutootmine. Reaktori töötamise käigus toimub suletud tsüklis aktiniidijätmete täielik ümbertöötlemine ja lõhustusproduktide pidev eemaldamine. Reaktori tööd

katkestamata on võimalik lisada tuumkütust - ^{238}U kõrval ka plutooniumit ja muid aktiniide. Sulasoolareaktorite kütusetsükkel töötab mitmeid positiivseid lahendusi: kõrge ohutusetase suvalise suurusega reaktori puhul tänu madalarõhulise passiivse soojuskandja kasutamisele; väike kütusevajadus briiderina töötamise ja seega endale tuumkütuse tootmise (ühe miljardi kWh tootmiseks kulub ainult 50 kg ^{238}U ja samapalju ^{232}Th); pikaealiste aktiniidjäätmete „põletamine“, nii et kõrgaktiivsed jäätmel sisaldavad ainult lühiealisi lõhustusprodukte; tuumarelvamaterjali oluline vähenemine kasutatud tuumkütuses, sest peamiseks plutooniumiisotoobiks on relvaks sobimatu ^{242}Pu ; puudub vajadus kütuseelementide valmistamise seadmete järele..

Varasemaid kogemusi sellise reaktoritüübiga on USA-1, kus prototüüp käivitati juba 1960-ndatel, ja Prantsusmaal. Hiljem on katsetatud liitium- ja berülliumfluoriidi soojuskandjas lahustatud tooriumi ja ^{233}U -kütuseid.

53

Ülekriitilise veega jahutatud reaktor. Ülikõrgsurve reaktor, mille jahutus toimub termodünaamilisest kriitilisest punktist kõrgemale viidud veega. Jaama töö tasakaalustamine on oluliselt lihtsam, sest reaktoris ei toimu soojuskandja faasimuutust (st, vesi ei muutu auruks ja aur – veeks). Puudub sekundaarne aurukontuur ja ülekriitiline vesi temperatuuril $510\text{--}550^\circ\text{C}$ ja rõhul 25 MPa käitab vahetult turbogeneraatorit. Tulemuseks on praeguste veereaktoritega võrreldes kolmandiku võrra suurem soojusefektiivsus. Kütusena nähakse ette rikastatud uraanoksiidi kasutamist aeglase neutronite reaktori variandis avatud kütusetsükklis. Reaktor on siiski ehitatav ka kiirete neutronite reaktorina suletud kütusetsükklis. Sel juhul korraldatakse aktiniidide täielik ümbertöötlemine taaskasutuseks eraldi paiknevas kütusetöötlemise rajatises. Passiivse ohutuse meetmed on sarnased praeguste keevveereaktorite omadele. Enamik selle reaktoritüübi uuringuid ja arendusi on tehtud Jaapanis.

Kontsentratsioon toorium on väga nõrk maakoos, ja väga raske saada. Seetõttu ta ei ekstrakti tooriumi ja tagasi ta kaevandamise haruldaste muldmetallide mineraalid (Monazite, Torit ja torionit). Toorium leidub graniiti, kuid enamasti on osana Monazite turustajate nimed. Tavalise elu, see on must liiva rannad India ja Brasiilia.

Eelised tooriumi eelised urani ees:

- soojusjuhtivus ja sulamistemperatuur on tooriumil palju kõrgemad, see tähendab, et saab ka madalatel temperatuuritel ja turvaliselt
- tooriumi varud ületavad uraanivarusid 3-4 korda
- poolestusaeg tooriumiühenditel on lühem kui uraanil, see tähendab et toorium on uraanist palju ohutu ja keskkonnasõbralikum kütus
- toorium jäätmeid ei saa kasutada tuumarelvade tootmiseks
- 450 gr. tooriumist saab toota sama palju energiat kui 136 kg uraanist või 1587 tonnist kivisöest.

Idee kasutada tooriumid kui kütust on huvi tundnud on paljud riigid.