**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**

федеральное государственное автономное образовательное учреждение

высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО»**

ФАКУЛЬТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И ЭКОТЕХНОЛОГИЙ

РЕФЕРАТ

по дисциплине Энергетика и Устойчивое развитие

на тему: **«Замкнутый ядерный топливный цикл»**

студент Ковыляев Иван Сергеевич\_\_\_\_         W3260\_\_

(Фамилия, Имя, Отчество)                                                      (группа)

Направление подготовки (специальность)       14.03.01

(код, наименование)

Ядерная энергетика и теплофизика\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Квалификация  Бакалавр\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

(бакалавр, магистр)\*

Преподаватель Быковская Е.А.

(Фамилия, И. О.)

Санкт-Петербург

2021 г.

# СОДЕРЖАНИЕ

[**ВВЕДЕНИЕ**](#_30j0zll)3

[**Глава 1. Ядерный топливный цикл**](#_3w0iygcxmf1e)4

[**Глава 2. Атомные реакторы**](#_wkiwk9daka92)6

[**Глава 3. Замкнутый ядерный топливный цикл**](#_up800iy9doj0)10

[**Глава 4. Экология и радиологическая безопасность.**](#_hg7qpbn666nd)12

[**Глава 5. Перспективы**](#_qw2zu1wancuv)13

[**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**](#_u2daujqdx1fy)15

[**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**](#_opdn0c4q5ue4)16

[**ПРИЛОЖЕНИЕ**](#_x95m4on7yrr8)18

# ВВЕДЕНИЕ

Современная экологическая повестка добралась и до энергетики. И мы все чаще и чаще слышим о необходимости перехода на возобновляемые источники энергии. Однако ветрогенераторы и солнечные электростанции не способны покрыть все потребности человечества в дешевой и качественной энергии. Другой вариант развития событий - термоядерная энергетика. Однако в энергетике существует такая шутка: “До массовой термоядерной энергетики 20 лет — и всегда будет 20 лет”. Но все забывают про один очень дешевый, экологически безопасный, а главное стабильный источник энергии - атомные электростанции.

Россия является лидером мировой атомной промышленности, а госкорпорация Росатом обладает самыми передовыми технологиями в данной сфере. Одна из них - замкнутый ядерный топливный цикл, работы по замыканию которого идут в данные момент времени.

Если переходить к целям устойчивого развития, то нужно отметить тот факт, что Росатом ведет отчетность по всем целям. Данную информацию можно найти на их сайте в разделе «Устойчивое развитие» (ссылка в источниках). Основной упор госкорпорация делает на следующие цели: №7 (недорогая и чистая энергия) – основное преимущество атомных электростанций; №8 (достойная работа и экономический рост) - сооружение и эксплуатация АЭС с двумя энергоблоками обеспечивает занятость более 10 тыс. человек в сфере ядерной инфраструктуры и создают более 3000 новых рабочих мест для работы на АЭС; №12 (ответственное потребление и производство) - деятельность госкорпорации по обращению с отходами ориентирована на повышение экологической безопасности и сохранение окружающей среды; №13 (борьба с изменением климата) - Генерация электроэнергии на атомных электростанциях (далее - АЭС) является одним из источников низкоуглеродной энергии и обладает существенным экологическим эффектом. Работа всех АЭС российского дизайна в мире экономит выбросы порядка 210 млн тонн CO2 в год, в том числе на территории Российской Федерации 107 млн тонн CO2

Существует открытый ядерный топливный цикл, о котором мы поговорим в первой главе, однако топливо из одного типа реакторов после небольшой переработки можно использовать в другом типе реакторов. О всех типах реакторов мы поговорим во второй главе. А благодаря повторному использованию топлива мы можем говорить о замыкании ядерного топливного цикла. Об этой технологии мы поговорим в третьей главе.

Существует такой термин - радиофобия. Есть даже точная дата его появления - 26 апреля 1986 года. О том, как обстоят дела с экологической обстановкой и радиационной безопасностью мы поговорим в четвертой главе. А о перспективах технологии и ее значении для мировой энергетики мы поговорим в главе номер пять.

# 

# Глава 1. Ядерный топливный цикл

Любая электростанция, работающая на топливе, начинается с добычи этого топлива. Атомная электростанция начинается с главного компонента ядерного топлива - урана.

Существует два способа добычи урана - получение руды и подземное выщелачивание. Рассмотрим каждый подробнее.

Получение руды можно разделить на два способа: открытый и закрытый. Открытый способ добычи урана подразумевает разработку карьера, откуда извлекается руда. Закрытый - разработка шахты, которая является более безопасной для природы, но опаснее для людей, живущих над выработками шахт. Извлеченная руда отправляется на дробление, а дальнейшую технологию получения сухого уранового концентрата рассмотрим во втором способе получения урана.

Второй вариант получения урана - подземное выщелачивание[4]. Это более экологически чистый способ добычи. Он подразумевает бурение большого количества скважин. По одним под землю закачивается предварительно приготовленный выщелачивающий раствор, который доукрепляют серной кислотой и вводят нитрат натрия. По другим скважинам выкачивают раствор вместе и извлеченными ионами урана. Из полученного раствора уран извлекают ионообменными смолами. Затем уран отделяют от смол и химически осаждают при помощи перекиси водорода. Смола в свою очередь после очистки возвращается в колонны для дальнейшего использования. Насыщенная ураном суспензия затем обезвоживается путем фильтрации и подвергается обжигу для получения конечного продукта – желтого кека или закиси-окиси урана, который отправляется заказчикам.

Описанная выше технология выделения урана из руды используется и в первом варианте добычи (конечно, с небольшими отличиями).

Подробнее о получении “желтого кека” можно почитать в информационной бюллетени Международного Агенства по Атомной Энергетике (МАГАТЭ) [1] .

В России уран добывает компания АО «Атомредметзолото», которая является управляющей компанией Горнорудного дивизиона госкорпорации Росатом. Добычу горным образом осуществляет «Приаргунское производственное горно-химическое объединение» (ППГХО, Забайкальский край). Добычу способом подземного выщелачивания занимаются АО «Хиагда» в Республике Бурятия и АО «Далур» в Курганской области [6].

После полученная закись-окись урана отправляется на обогащение. Обогащение урана осуществляется на предприятиях Топливной компании Росатома «ТВЭЛ». В разделительно-сублиматный комплекс входят четыре российских обогатительных комбината: АО «Ангарский электролизный химический комбинат» (г. Ангарск, Иркутская область), АО «ПО «Электрохимический завод» (г. Зеленогорск, Красноярский край), АО «Уральский электрохимический комбинат» (ЗАТО Новоуральск, Свердловская область) и АО «Сибирский химический комбинат» (ЗАТО Северск, Томская область). Они используют самую эффективную в настоящее время технологию обогащения – газоцентрифужную[7].

Желтый кек благодаря химическим реакциям переходит в гексафторид урана, который переходит в газообразную форму при 56 градусах цельсия. Полученный газ отправляется в центрифуги, где разные изотопы урана благодаря центробежным силам и разностям массы распределяются по объему камеры. Более тяжелые изотопы урана-238 скапливаются у стенок, а более легкие изотопы урана-235 – в центре центрифуги. Правда, данный процесс требует огромного количества центрифуг - несколько тысяч в одной системе.

После обогащения уран отправляется на производство ядерного топлива. В России производством топлива занимается Топливная компания Росатома «ТВЭЛ». Фабрикация топлива - это процесс создания тепловыделяющих сборок (ТВС) для ядерных реакторов. В комплекс фабрикации ядерного топлива входят ПАО «Машиностроительный завод» (г. Электросталь, Московская область), ПАО «Новосибирский завод химконцентратов» (г. Новосибирск), АО «Чепецкий механический завод» (г. Глазов, Республика Удмуртия), АО «Московский завод полиметаллов» (г. Москва) [8].

На данном этапе происходит изготовление циркониевых корпусов, формирования топливных таблеток из смеси диоксида урана и плутония, их упаковка в произведенные до этого корпуса (получение ТеплоВыделяющих Элементов) и сборка полученных ТВЭЛов в ТеплоВыделяющие Сборки (далее – ТВС).

После собранные ТВС отправляются на атомные электростанции, где работают по 4-5 лет. После отработанное топливо отправляют в бассейн выдержки, где топливо охлаждается до комнатной температуры. После топливо отправляют в хранилище отработанного ядерного топлива (далее – ХОЯТ).

Описанная выше технология не является точной и полной, а приведена с сокращениями для облегчения понимания и по причине отсутствия специфической информации в открытых источниках по понятным причинам. *Схема данной технологии приведена в приложении №1.*

# Глава 2. Атомные реакторы

Теперь пора рассмотреть еще один важный элемент замкнутого ядерного топливного цикла (далее – ЗЯТЦ) - атомные реакторы. Мы будем рассматривать те реакторы, которые применяются или применялись на промышленных атомных электростанциях на территории Советского Союза и Российской федерации.

Начнем с самых первых реакторов - Атом Мирный Большой (сокращенно - АНБ). Данный тип реакторов применялся на первой промышленной атомной электростанции СССР - Белоярской АЭС в Свердловской области. На ней было построено два реактора - один на 100 электрических МВт и получивший индекс АМБ-100, второй - на 200 электрических МВт и получивший индекс АМБ-200.

АМБ-100 работал по двухконтурной схеме. В нем пароводяная смесь из испарительных каналов (ИК) поступает в сепаратор, после чего отсепарированный пар направляется в испаритель, где его тепло обеспечивает испарение питательной воды, циркулирующей по 2-му контуру. Полученный в испарителе пар перегревается до заданной температуры в перегревательных каналах и направляется в турбину.

АМБ-200 работал по одноконтурной схеме, в соответствии с которой отсепарированный пар поступает прямо в пароперегревательные каналы (ППК) реактора и после них на турбину. Схема 2-го блока значительно проще схемы 1-го блока, главным образом благодаря исключению громоздких и дорогостоящих парогенераторов. Переход на одноконтурную схему позволил также упростить регулирование работы установки.

На текущий момент оба реактора АМБ остановлены и находятся в процессе вывода из эксплуатации.

Также существуют реакторы ЭГП-6, построенные в количестве 4 штук на Билибинской АЭС в Чукотском автономном округе. ЭГП-6 расшифровывается как Энергетический Гетерогенный Петлевой реактор с 6-ю петлями циркуляции теплоносителя. Тепловая мощность реактора ЭГП-6 была принята 65 МВт, электрическая – 12 МВт. Особенностью конструкции является естественная циркуляция теплоносителя. Выработка насыщенного пара производится в каналах активной зоны.

ЭГП-6 является доработанной версией реакторов АМБ. На текущий момент выводится из эксплуатации энергоблок №1 на Билибинской АЭС, реакторы №2, 3, 4 эксплуатируются по текущий момент. Особенностью Билибинской АЭС является двойное назначение - реакторы вырабатывают как электроэнергию, которая питает Билибинскую энергосистему, так и тепло, которое идет на отопление поселка Билибино.

Логическим продолжением реакторов ЭГП-6 стали реакторы РБМК (Реактор Большой Мощности Канальный). Первый реактор был построен на Ленинградской АЭС и получил индекс РБМК-1000.

Основу активной зоны РБМК-1000 составляет графитовый цилиндр высотой 7 м и диаметром 11,8 м, сложенный из блоков меньшего размера, который выполняет роль замедлителя. Графит пронизан большим количеством вертикальных отверстий, через каждое из которых проходит труба давления (также называемая технологическим каналом – ТК). Центральная часть трубы давления, расположенная в активной зоне, изготовлена из сплава циркония с ниобием (Zr + 2,5 % Nb), обладающего высокой механической и коррозионной устойчивостью, верхние и нижние части трубы давления — из нержавеющей стали. Циркониевая и стальные части трубы давления соединены сварными переходниками.

Реактор РБМК работает по одноконтурной схеме. Циркуляция теплоносителя осуществляется в контуре многократной принудительной циркуляции (КМПЦ). В активной зоне вода, охлаждающая ТВЭЛы, частично испаряется и образующаяся пароводяная смесь поступает в барабаны-сепараторы. В барабан-сепараторах происходит сепарация пара, который поступает на турбоагрегат. Остающаяся вода смешивается с питательной водой и с помощью главных циркуляционных насосов (ГЦН) подается в активную зону реактора. Отсепарированный насыщенный пар (температура ~284 °C) под давлением 70-65 кгс/см2 поступает на два турбогенератора электрической мощностью по 500 МВт. Отработанный пар конденсируется, после чего, пройдя через регенеративные подогреватели и деаэратор, подается с помощью питательных насосов (ПЭН) в КМПЦ.

Реакторы РБМК-1000 строились на Ленинградской, Курской, Чернобыльской, Смоленской АЭС. Более мощный реактор РБМК-1500 использовались на Игналинской АЭС в Литве. Всего было построено 18 энергоблоков, 1 из них утерян в результате аварии на Чернобыльской АЭС, 7 энергоблоков из 18 остановлены, 7 реакторов из запланированных не были построены.

Реакторы АМБ, ЭГП-6 и РБМК строились по общему принципу конструкции - графито-водные реакторы. К сожалению, данные реакторы оказались сложнее в эксплуатации и выводе из эксплуатации чем реакторы ВВЭР и другие. Сейчас ведется разработка реакторов МКЭР (Многопетлевой канальный энергетический реактор), однако в публичном поле об этой разработке отсутствует информация.

Следующим шагом после РБМК стали Водо-Водяные Энергетические Реакторы (ВВЭР). Существенное отличие данного типа реактора - отсутствие графитовых оболочек.

Реакторы ВВЭР существуют в нескольких вариантах по тепловой и энергетической мощности:

1. ВВЭР-210
2. ВВЭР-365 (В-3М)
3. ВВЭР-440
4. ВВЭР-640 (проект)
5. ВВЭР-1000
   1. ВВЭР-1000 (проекта В-187) — блок № 5 Нововоронежской АЭС (головной блок ВВЭР-1000)
   2. ВВЭР-1000 (проектов В-338, В-325) — так называемая «малая серия»
   3. ВВЭР-1000 (проекта В-320) — «большая серия»
   4. ВВЭР-1000 (проекта В-392)
   5. ВВЭР-1000 (проекта В-466)
   6. ВВЭР-1000 (проекта В-412)
6. ВВЭР-1500 (проект)

Принцип работы реакторов ВВЭР можно описать следующим образом: в реакторе происходит преобразование энергии, выделяющейся при цепной реакции деления ядер урана, в тепловую энергию теплоносителя первого контура. Нагретый теплоноситель поступает с помощью циркуляционных насосов в парогенераторы, где отдает часть своего тепла воде второго контура. Производимый в парогенераторах пар поступает в паротурбинную установку, приводящую в движение турбогенератор, который вырабатывает электроэнергию.

Данные реакторы являются самыми распространенными как на территории России, так и в мире. Полный перечень построенных и введенных в эксплуатацию реакторов представлен в Таблице 1.

Таблица 1 – АЭС с реакторами типа ВВЭР

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Страна | Название | В работе | Остановлены |
| Россия | Балаковской | 4 |  |
| Калининская | 4 |  |
| Кольская | 4 |  |
| Нововоронежская | 4 | 3 |
| Ростовская | 4 |  |
| Ленинградская-2 | 2 |  |
| Украина | Запорожская | 6 |  |
| Южно-Украинская | 3 |  |
| Ровенская | 4 |  |
| Хмельницкая | 2 |  |
| Словакия | Богунице | 2 | 2 |
| Моховце | 2 |  |
| Чехия | Дукованы | 4 |  |
| Темелин | 2 |  |
| Армения | Армянская | 1 | 1 (после землетрясения) |
| Болгария | Козлодуй | 2 | 4 |
| Венгрия | Пакш | 4 |  |
| Индия | Куданкулам | 2 |  |
| Иран | Бушер | 1 |  |
| Китай | Тяньваньская | 4 |  |
| Финляндия | Ловииза | 2 |  |
| Германия | Грайфсвальд |  | 4 |
| Райнсберг |  | 1 |
|  | **Итого**: | 61 | 15 |

Всего в эксплуатации 61 энергоблок, 15 были остановлены (по требованиям Евросоюза, либо из-за землетрясения).

Энергоблоки ВВЭР зарекомендовали себя как крайне надежные и беспроблемные источники энергии, которые могут применятся повсеместно. Помимо 76 построенного энергоблока, есть еще 14 запроектированных энергоблоков и 8 строящихся энергоблоков. Также, довольно большое количество энергоблоков были недостроены из-за аварии на Чернобыльской АЭС и развала СССР.

Последним типом реакторов являются реакторы на Быстрых Нейтронах (БН). Всего в России эксплуатируется 2 реактора данного типа (БН-600 и БН-800), расположенных на Белоярской АЭС.

Особенностью данных реакторов является другой тип топлива, теплоносителя и конструкции.

Главное преимущество ядерных реакторов на быстрых нейтронах состоит в том, что они открывают возможность использования не делящихся в реакторах на тепловых нейтронах изотопов тяжёлых элементов. В топливный цикл могут быть вовлечены запасы Уран-238 и Торий-232, которых в природе значительно больше, чем Уран-235 — основного топлива для реакторов на тепловых нейтронах. В том числе может быть использован и так называемый «обедненный уран», оставшийся после обогащения ядерного топлива Уран-235[9].

Реакторы на быстрых нейтронах (БН) дают реальную возможность расширенного воспроизводства ядерного топлива. Это значит, что, например, на 100 разделившихся ядер топлива в реакторах на быстрых нейтронах образуется примерно 120—140 новых ядер, способных к делению.

Реакторы БН-600 и БН-800 являются единственными промышленными работающими реакторами данного типа в мире, а также являются одним из важнейших компонентов замыкания ядерного топливного цикла.

Конструкция реакторов БН сложнее, нежели конструкция РБМК и ВВЭР, однако данный тип реакторов может работать на большем количестве изотопов, что расширяет топливную базу.

# 

# Глава 3. Замкнутый ядерный топливный цикл

После того, как мы разобрались с открытым ядерным циклом и реакторами, можно переходить к замкнутому ядерному циклу.

Для начала дадим определение ЗЯТЦ. Замкнутый ядерный топливный цикл - цикл, в котором отработавшее ядерное топливо, выгруженное из реактора, перерабатывается для извлечения урана и плутония для повторного изготовления ядерного топлива.

Итак, начнем с реакторов. Как упоминалось ранее, все реакторы можно разделить на два больших класса: на тепловых нейтронах и на быстрых нейтронах. К первым относятся РБМК, ВВЭР и другие, а ко второму - БН. И тут есть важный нюанс: реакторы на тепловых нейтронах вырабатывают энергию путем деления урана-235 и плутония-239. Большую часть (95%) ядерного топлива составляет уран-238, который не делится внутри реакторов на быстрых нейтронах. Реакторы же на быстрых нейтронах способны работать на уране-238 с образованием плутония-239, при том данная технология позволяет нарабатывать плутоний-239 эффективнее, нежели в тепловых реакторах.

Благодаря тому, что реакторы БН способны нарабатывать плутоний-239, появляется возможность использовать после переработки топливо от БН в реакторах на тепловых нейтрона и вовлечь в работу оставшиеся элементы топлива, ведь в природном сырье концентрация урана-238 составляет около 99%.

Теперь перейдем непосредственно к главному элементу ЗЯТЦ - MOX (Mixed OXide, либо МОКС) топливу. Фактически, это переработанное топливо, которое можно использовать в реакторах, при том как на тепловых нейтронах, так и на быстрых нейтронах. Наибольшую эффективность данное топливо приобретает в реакторах БН.

Использование МОКС-топлива позволяет переработать отработавшее «горючее» и изготовить новое смешанное уран-плутониевое топливо, в котором количество энергии, которое можно получить от природного урана, увеличивается примерно в 100 раз. При этом, после переработки ОЯТ, количество радиоактивных отходов, подлежащих специальной обработке и захоронению, уменьшается кратно. Это является важным показателем по цели устойчивого развития №12. Реакторы на быстрых нейтронах также способны «дожигать» долгоживущие (с периодом распада до тысяч и сотен тысяч лет) радиоактивные продукты деления, превращая их в короткоживущие с периодом полураспада в 200—300 лет.

Промышленное производство МОХ-топлива Росатом начал в сентябре 2015 года на своём Горно-химическом комбинате в Железногорске, Красноярского края. Проектная мощность пускового комплекса составляет 400 ТВС в год и должна была быть достигнута в 2019 году, однако реально промышленное производство началось уже в августе 2018 года, когда первая серийная партия топливных сборок была отправлена на Белоярскую АЭС.

Как проще представить себе ЗЯТЦ? Отработанное топливо от реакторов РБМК и ВВЭР охлаждается и отправляется на переработку, где к нему добавляют немного обогащенного топлива и других элементов (все же технология и полный состав топлива засекречен). После этого, полученное МОКС топливо отправляют на АЭС с реакторами БН, где происходит расщепление урана-238 до плутония-239, сжигание вредных долгоживущих элементов и фактически производство топлива для реакторов РБМК и ВВЭР. При этом, реакторы БН при наработке ядерного топлива в состоянии вырабатывать и огромное количество энергии (600 энергетических мегаватт для БН-600 и 800 энергетических мегаватт для БН-800). Одна технология позволяет закрыть сразу две потребности.

*Схему данного процесса можно посмотреть в приложении №2.*

# Глава 4. Экология и радиологическая безопасность

Теперь пришла пора поговорить об экологических аспектах данной технологии. По факту, данная технология убивает одну проблему атомной промышленности - отходы. Рядом с каждой АЭС есть хранилище отработанного ядерного топлива. Это топливо требует повышенного внимания к себе, постоянное охлаждение и контроль. При этом, до замыкания топливного цикла и начала производства МОКС топлива, его было проблематично использовать еще раз.

Замкнутый ядерный топливный цикл позволяет вернуть это отработанное топливо в работу, вовлечь невостребованный уран-238 в технологический процесс, утилизировать оружейный плутоний-239, и получать энергию. Это является важным показателем цели устойчивого развития №12 – ответственное потребление и производство.

И да, важно уточнить, что является радиоактивными отходами в РФ, а что нет. По нашему законодательству (Федеральный закон от 21.11.1995 N 170-ФЗ (ред. от 26.07.2019) "Об использовании атомной энергии")[14], радиоактивные отходы - то, что нельзя использовать еще раз. И только ядерные отходы можно утилизировать и захоранивать, а отработанное топливо отходами не является, и его приходится хранить.

И опровергнем один из распространенных мифов, касаемых Росатома и атомной промышленности в целом. Некоторые считают, что, ввозя на территорию РФ “урановые хвосты” Росатом загрязняет нашу страну. По факту, это вклад в будущее и возможность, во-первых, получить еще урана-235 из данного гексафторида-урана благодаря более продвинутой технологии обогащения урана, а во-вторых, мы получаем полноценное сырье для реакторов БН и составную часть MOX топлива.

Помимо решения проблемы опасности радиационного загрязнения территории отработанным ядерным топливом мы решаем еще и проблему радиологической безопасности. Любой радиоактивный элемент - источник повышенной опасности, за которым нужен особый контроль. Вовлечение отработавшего ядерного топлива снова в топливный цикл позволяет снизить опасность ХОЯТ.

Также к неоспоримым преимуществам ЗЯТЦ можно отнести снижение потребности в свежем топливе для АЭС, а следовательно возможность снижения его добычи и повышение энергонезависимости РФ от поставок урана из других стран.

# Глава 5. Перспективы

Для разговора о перспективах замкнутого ядерного топливного цикла нужно сначала разобраться: а какие перспективы собственно у самой атомной энергетики?

Начнем с того, что у атомной энергетики нет конкурентов. Да, конечно есть ГЭС и подобные электростанции, которые способны вырабатывать огромное количество киловатт-часов энергии в год. Однако ГЭС можно установить не на каждой реке, они влияют на окружающую среду и микроклимат затопленной и прилежащей территории, она преграждает реку и так далее. Да и устанавливать ГЭС где-нибудь за полярным кругом - странная затея.

Другой вариант - тепловая генерация. Однако тут уже вступают правительства и эко активисты, говоря, что этот тип источников энергии нужно запретить как можно скорее. С ними сложно спорить, ибо любая электростанция на ископаемом топливе, получающая энергию путем его сжигания, выбрасывает в воздух микрометровые частицы (PM2,5) которые непосредственно влияют на здоровье сотен и тысяч людей. Однако это самый дешевый и простой способ получения электроэнергии, и вряд ли человечество от него откажется.

Также можно рассмотреть солнечную и ветровую генерацию, однако давайте вспомним что было зимой 2021 года в Техасе? Правильно - энергетический коллапс из-за аномальных заморозков и полномасштабного замещения других источников энергии “зелеными”. А теперь давайте подумаем, что можно установить где-нибудь за полярным кругом, где по полгода нет солнца, а ветер в состоянии снести любой ветряк и любую конструкцию… Да и стабильность генерации - слабое место данного типа источника электроэнергии: нам нужны аккумуляторные батареи, которые будут накапливать энергию тогда, когда ее много, и отдавать, когда есть потребность. Но аккумуляторные батарее вообще не экологичные: очень грязное производство (добыча лития, его обработка), невозможность переработки (две технологии: закопать или сжечь и закопать), опасность при возгорании и так далее[15].

Отдельностоящая отрасль - водородная энергетика. Эта та отрасль, которую понять я не в состоянии: мы должны тратить энергию, чтобы получить топливо из воды или вообще другого топлива? Зачем? Почему бы нам не использовать по назначению эту энергию и это топливо? Да и водород как бы не самое безопасное топливо для человека (взрывается оно очень хорошо). Вопрос: зачем тратить и так дефицитный ресурс в никуда?

Термоядерная энергетика вообще неосуществимое и бесполезное новшество. Мало того, что мы до сих пор не имеем даже работающего исследовательского реактора, все его преимущества перекрываются недостатками. Посудите сами: большое количество нужных изотопов водорода, которые можно найти в воде перекрывается еще большим количеством изотопов урана все в той же морской воде. Для запуска и работы термоядерного реактора необходимо огромное количество энергии, который вряд ли сможет покрыть его выработка. Да и размеры реактора и вспомогательных зданий поражает. В общем, термоядерная энергетика - невозможное будущее.

И вот тут-то появляется атомная энергетика: дешевое, универсальное, мощное решение для любых климататических условий. Достаточно сказать, что у Росатома есть три АЭС расположенных за полярным кругом: Кольская, Билибинская и плавучая АЭС “Академик Ломоносов”. То есть АЭС можно расположить в любой точке мира. Также, АЭС способны вырабатывать огромное количество киловатт-часов энергии в год (215,7 млрд. квт\*ч за 2020 год только у Росатома). АЭС при эксплуатации не выбрасывают ничего в атмосферу (если конечно не считать нерадиоактивный водяной пар). Да и отходов от работы АЭС минимум, и то по большей части это сырье.

То есть АЭС является самым перспективным источником энергии для человечества. Но есть одно но: топливо не бесконечно.

Однако замкнутый топливный цикл в состоянии перекрыть этот недостаток и обеспечить энергией человечество на несколько столетий, если не тысячелетий вперед.

Технически, топливный цикл еще не замкнут - его замыкание происходит прямо сейчас.

Так, полное сгорание невозможно в одном топливном цикле: прошедшее через реактор один раз топливо теряет считанные проценты от исходного содержания делящегося изотопа. Килограмм урана, прошедший через реактор один раз, выработает только 620 тысяч киловатт-часов, а вовсе не восемь миллионов. Именно по этой причине мы не можем говорить об окончании замыкания ядерного топливного цикла.

Росатом нацеливается на рециклинг — неоднократное пропускание отработавшего топлива через АЭС. Причем на всех циклах объем массы отработавшего топлива будет несколько сокращаться, поскольку с каждым новым циклом часть его массы превращается в энергию.

В рамках такого рециклинга каждая тонна ОЯТ выработает восемь миллиардов киловатт-часов электроэнергии. Столько же за 25 лет своей работы вырабатывают 12 огромных ветряков мощностью по восемь мегаватт и высотой в 200 метров каждый. Такое количество электроэнергии потребляет средний российский город-миллионник.

На текущий момент в России 23 тысячи тонн отработанного ядерного топлива. Если посчитать примерно, то получится, что из этого количества ядерного топлива можно получить ~180 триллионов киловатт-часов энергии. Это колоссальнейшие запасы, которые в будущем сможет еще больше обеспечивать человечество энергией. А мы даже не учитываем запасы других стран.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, мы подошли к логическому завершению работы. И тут надо поговорить о том, какую часть электрической генерации дает атомная энергия. Для этого воспользуемся отчетом BP от июля 2021 года и посчитаем генерацию за 2020 год, приведенную в Таблице 2:

Таблица 2 – Выработка электроэнергии по типу источника, данные BP за 2020 год

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Тип | Выработка, ТВт·ч | Процент выработки |
| Уголь | 152,3 | 14,03% |
| Газ | 485,5 | 44,73% |
| Атом | 215,9 | 19,89% |
| Гидро | 212,4 | 19,57% |
| Солнце | 1,9 | 0,17% |
| Нефть | 10,7 | 0,99% |
| Ветер | 1,1 | 0,10% |
| Остальное | 5,5 | 0,51% |
| Всего: | 1085,4 | 100,00% |

Мы видим, что атомная энергетика дает ⅕ всего потребления РФ, столько же дает и гидро. А альтернативные источники энергии дают всего ~ 0,27%.

Атомная энергетика позволяет получать дешевую, безопасную и экологически чистую энергии в больших объемах (215,9 ТВт·ч за 2020 год), при этом используя небольшую площадь.

Также, данный тип электростанции не вырабатывает CO2, что положительно сказывается на окружающей среде. Это описывается в цели устойчивого развития №13. Энергия, полученная на АЭС, является дешевой (1,41 рубль за кВт·ч в 2018 году), что является важным показателем для цели устойчивого развития №7.

Замкнутый ядерный топливный цикл позволит использовать возможности российских АЭС намного дольше, чем открытый топливный цикл. Также, данная технология позволяет перерабатывать и снова использовать отработанное ядерное топливо. При текущем потреблении РФ только атомная энергетика на запасах отработанного топлива сможет обеспечивать энергией страну еще примерно 170 лет. При этом не стоит забывать и про гидроэнергетику, и про альтернативные и ископаемые источники энергии.

Помимо этого, замкнутый топливный цикл позволяет вовлечь все 100% добываемого урана в производство энергии, а не только 3% урана-235.

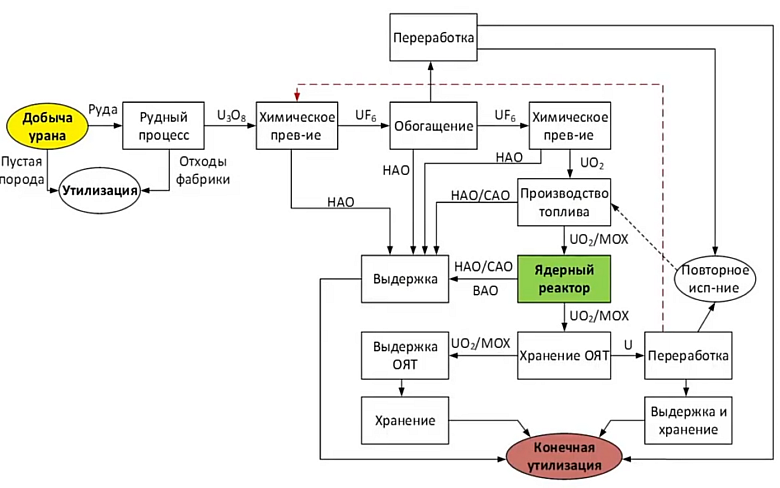
Замкнутый топливный цикл - технология будущего, которая сможет обеспечить человечество зеленой энергией в будущем.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Д. К. Сейдель Извлечение урана из руд // Бюллетень МАГАТЭ, том 23, №2. - 2020. - С. 29-33. (<https://www.iaea.org/sites/default/files/23204882428_ru.pdf>)
2. Как отодвинуть пик урана на 10 тысяч лет // Habr.com URL: https://habr.com/ru/post/388533/ (дата обращения: 06.10.2021).
3. Разделяй и властвуй // Атомная энергия URL: https://www.atomic-energy.ru/SMI/2015/05/06/19338 (дата обращения: 06.10.2021).
4. Что такое технология СПВ? // Uranium One Group Rosatom URL: https://www.uranium1.com/ru/clean-energy/isr-mining/#processing (дата обращения: 06.10.2021).
5. СПОСОБ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ УРАНА ИЗ РУД // Яндекс.Патенты URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2572910C2\_20160120 (дата обращения: 06.10.2021).
6. Добыча урана // Росатом URL: https://rosatom.ru/production/mining/ (дата обращения: 06.10.2021).
7. Обогащение урана // Росатом URL: https://rosatom.ru/production/m-urana/ (дата обращения: 06.10.2021).
8. Производство ядерного топлива // Росатом URL: https://rosatom.ru/production/production/ (дата обращения: 06.10.2021).
9. История реакторов // Библиотека Росатома URL: http://www.biblioatom.ru/evolution/istoriya-osnovnyh-sistem/istoriya-reactorov/ (дата обращения: 06.10.2021).
10. Илон Маск прав: термояд не нужен. Будущее, которого у нас не будет // Naked science URL: https://naked-science.ru/article/nakedscience/noneedforfusion (дата обращения: 11.10.2021).
11. «Миллионы тонн ядерных отходов»: крупнейший миф атомной энергетики // Naked science URL: https://naked-science.ru/article/nakedscience/milliony-tonn-yadernyh-othodov-krupnejshij-mif-atomnoj-energetiki (дата обращения: 11.10.2021).
12. Замкнутый ядерный топливный цикл - доклад Росатома // science.spb.ru URL: http://science.spb.ru/files/tehplatformy/neutron/presentation/files/assets/common/downloads/publication.pdf (дата обращения: 11.10.2021).
13. Ядерный реактор для чайников: замыкание топливного цикла в двухкомпонентной ядерной энергетике // habr.com URL: https://habr.com/ru/company/leader-id/blog/520580/ (дата обращения: 11.10.2021).
14. Закон Российской Федерации "ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ" от 21.11.1995 № 170-ФЗ // Российская газета. - 28.11.1995 г. - с изм. и допол. в ред. от 30.04.2021.
15. Производство литий-ионных аккумуляторов: климатическая катастрофа? // Зеленая энергетика URL: http://energy.esco.agency/rubriki-zhurnala/novye-tehnologii-v-jenergetike/372/proizvodstvo-litij-ionnyh-akkumuljatorov-klimaticheskaja-katastrofa (дата обращения: 28.10.2021).

# ПРИЛОЖЕНИЕ

Приложение 1. Схема открытого ядерного топливного цикла [13]



Приложение 2. Схема замкнутого ядерного топливного цикла [13]

