

**Заключение.** Вопрос обращения с РАО высокой активности сегодня актуален во многих странах. Это связано с тем, что на многих АЭС в процессе эксплуатации скопилось большое количество РАО, кроме того в настоящее время многие станции в мире подлежат демонтажу. Сегодня технология остекловывания является лучшей для иммобилизации ВАО. Поскольку боросиликатные стекла очень стабильны и долговечны [3]. Они обеспечивают высокий уровень надежности в течение длительного периода времени. Данную технологию используют многие страны, такие как Франция, Япония, Германия, США и др.

**Список литературы:**

1. Батюхнова О.Г. Российская федерация, Бергман К. Швеция и др. Технологические и организационные аспекты обращения с радиоактивными отходами // Международное агентство по атомной энергии, Вена, 2005, с. 135 – 143.
2. G/ Roth, « INE's HLLW Vitrification Technology», atw 40. Jg., Heft 3, 1995, S. 144-177
3. Ляшенко А.В. СЧВ-иммобилизация высокоактивных промышленных отходов.-М.: Наука, 2004. – 275с

### Использование тория в малогабаритных реакторах

Храпов Д. А.

[cheshirskyvolk@mail.ru](mailto:cheshirskyvolk@mail.ru)

*Научный руководитель: доцент, кандидат физико-математических наук, Чертков Ю. Б., Кафедра физико-энергетических установок (ФЭУ), ФТИ, ТПУ.*

Внедрение ториевого топлива в атомную энергетику диктуется несколькими причинами: запасы тория на планете превосходят запасы урана в 4 - 5 раз. Ториевые месторождения более доступны, чем урановые. Особенно это важно для России: российских разведанных запасов урана хватит только на 20 лет, а запасов тория в месторождениях в районе Новокузнецка и Томска (туганское месторождение тория, титана, циркония) достаточно много.

С точки зрения наработки делящихся нуклидов, преимущество тория перед ураном состоит в его тугоплавкости: лишь при 1400-1500°C кристаллическая решетка тория начинает претерпевать фазовые превращения. Это позволяет реактору на ториевом горючем работать при более высоких температурах. Ториевая энергетика, в отличие от урановой, не нарабатывает плутоний и трансурановые элементы. Это важно как с экологической точки зрения, так и с точки зрения нераспространения ядерного оружия (Выделение из уранового топлива оружейных актиноидов позволяет создать государствам-«изгоям» и террористам собственное ядерное оружие).

Только один из изотопов тория ([торий-232](#)) обладает достаточно большим [периодом полураспада](#) по отношению к [возрасту Земли](#), поэтому практически весь природный торий состоит только из этого нуклида. Сам <sup>232</sup>Th тепловыми нейтронами не делится, но поглощение нейтрона торием-232 приводит к образованию урана-233, имеющего высокую вероятность испускать нейтроны в результате деления потоками тепловых и промежуточных нейтронов. Поэтому его

роль в ядерном реакторе такая же, как у  $^{238}\text{U}$ : при поглощении нейтронов они превращаются во вторичные делящиеся тепловыми нейтронами нуклиды. <sup>[1]</sup>

Торий-232 является лучшим "сырьевым" изотопом по сравнению с ураном-238 для реакторов с тепловым спектром нейтронов. Уран-233 испускает более двух нейтронов в расчёте на один захват первичного нейтрона для широкого набора реакторов с тепловым спектром нейтронов.

Диоксид тория имеет большую химическую и радиационную стойкость в сравнении с диоксидом урана, а также лучшие теплофизические свойства (теплопроводность, коэффициент линейного расширения).

$^{233}\text{U}$  имеет самое большое значение коэффициента  $\eta_{\text{эф}}$ , характеризующего число вторичных нейтронов на один поглощенный топливом нейтрон - 2,29

При замене уранового цикла на ториевый в ядерном реакторе значительно снизятся темпы образования долгоживущих младших актинидов в ториевых реакторах. Если ториевый реактор будет работать исключительно в  $^{232}\text{U}$ -Th цикле, то актиниды с массами свыше 237 будут накапливаться в нём в пренебрежимо малых количествах.

Изотоп, к которому в ториевом цикле привлекается особенное внимание - это  $^{232}\text{U}$ . Он образуется за счёт реакций (n,2n) на изотопах  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{233}\text{Pa}$  и  $^{233}\text{U}$ . Период полураспада  $^{232}\text{U}$  составляет 69 лет. Среди его дочерних продуктов есть, например,  $^{208}\text{Tl}$  - изотоп с очень коротким временем жизни, испускающий жёсткие гамма-частицы (2,6 МэВ).

Из-за накопления  $^{232}\text{U}$  мощности дозы в ториевом топливе будут расти. Это создаёт дополнительные проблемы при обращении с ОЯТ ториевых реакторов, в частности, при рециклировании урана. Но одновременно наличие  $^{232}\text{U}$  в выгоревшем топливе увеличивает защищённость реактора и ЯТЦ от распространения.

Кроме этого ториевый цикл предпочтителен при утилизации оружейного плутония поскольку не приводит к его воспроизводству как в случае использования U-Pu топливного цикла.

В ториевых реакторах будет обязательно наблюдаться протактиниевый эффект, аналогичный по механизму образования нептуниевому эффекту в быстрых реакторах с урановым или уран-плутониевым топливом, но более неприятный с точки зрения управления. В проектах ториевых реакторов должен учитываться подъём реактивности при длительных остановах вследствие распада  $^{233}\text{Pa}$  в делящийся изотоп  $^{233}\text{U}$ .

Работы по исследованию возможностей использования тория в ядерном топливном цикле связаны, в основном, либо с наличием больших запасов тория (Индия), либо с желанием сократить потребление природного урана (Норвегия), либо с наличием ядерных энергетических технологий, способных использовать преимущества ториевого топливного цикла (Канада, Россия).

#### Индия

Правительство Индии дало разрешение на начало строительства экспериментального ториевого реактора на 300 МВт. Станции такого типа считаются настолько безопасными, что их можно строить прямо в городской черте, хотя экспериментальный реактор всё-таки построят вдали от города (сейчас выбирают из двух площадок). Конструкция реактора АНWR (advanced heavy water reactor) представляет собой продвинутый вариант тяжеловодного ядерного реактора, использующий канальную архитектуру, а также обычную воду в качестве теплоносителя. Замедлитель (тяжёлая вода  $\text{D}_2\text{O}$ ) находится в отдельных от

теплоносителя каналах под пониженным давлением. Особенностью индийского реактора являются большие резервуары с водой, которые находятся сверху всей конструкции и выполняют функции пассивной безопасности, то есть могут охладить реактор в случае аварии.

В Индии с целью повышения эффективности после запуска в блоки 1 и 2 АЭС в Какрапаре было загружено 500 кг ториевого топлива. 1-ый блок АЭС был первым в мире реактором, в котором для выравнивания мощности в активной зоне использовался не обедненный уран, а торий. Работая на ториевом топливе, 1-й блок вышел на полную мощность за 300 суток, а 2-й блок – за 100 суток. Ториевое топливо планируется использовать в блоках 1 и 2 А.Э.С в Кайга и в блоках 3 и 4 АЭС в Раджастане, которые находятся в стадии строительства.

Обладая запасами тория, в шесть раз превышающими запасы урана, Индия в качестве основной задачи промышленного производства энергии поставила задачу внедрения ториевого цикла, которая будет решаться в три этапа:

1) тяжеловодные реакторы CANDU, работающие на топливе из природного урана, будут использоваться для наработки плутония;

2) реакторы-бридеры на быстрых нейтронах (FBR) на основе полученного плутония будут производить U-233 из тория;

3) перспективные тяжеловодные реакторы будут работать на U-233 и тории, получая 75% энергии из тория.

Отработанное топливо затем будет перерабатываться для восстановления делящихся материалов и их последующей переработки.<sup>[2]</sup>

#### Япония

Японские специалисты в настоящее время разрабатывают по правительственному заказу миниатюрный ядерный реактор, который в перспективе может быть использовать для электроснабжения жилых домов и даже колоний на других планетах. И если вторая сфера применения остается скорее фантастикой, то мини-АЭС в подвале многоэтажного дома может стать реальностью уже достаточно скоро. Разрабатываемый реактор Rapid-L при высоте 6 м и ширине 2 м, способен вырабатывать до 200 кВт электричества, чего достаточно для питания офисного небоскреба или жилого дома. По словам МицуруКамбе (MitsuruKambe), возглавляющего группу исследователей в Центральном исследовательском институте электроэнергетики (CRIEPI), в будущем реакторы типа Rapid-L получат широкое распространение просто потому, что большие АЭС будет трудно построить из-за нехватки места для их размещения. Мини-реакторы также могут использоваться для компенсации пиковых нагрузок в крупных городских зонах, таких как Токийский залив. Принцип работы Rapid-L традиционен, однако вместо углеродных стержней, используемых в больших реакторах для регулирования интенсивности распада урана, в мини-реакторе используется жидкий литий-6 - изотоп лития, лучше других поглощающий нейтроны. Схема реактора и принцип его работы показан на рисунке. Внутри реактора имеются трубки, заполненные инертным газом. Над трубками располагаются емкости с литием-6. При повышении температуры металл расширяется и спускается вниз по трубкам, поглощая нейтроны и замедляя реакцию. То есть, литий-6 действует как "жидкий стержень", естественно, что в этом случае нужна в сложном механическом приводе для спуска и подъема твердых стержней, отпадает. Рабочая температура Rapid-L составляет 530С, а охлаждение осуществляется жидким натрием. Реактор, по утверждению разработчиков,

полностью безопасен, однако убедить жителей "ядерного" дома в безопасности реактора в подвале будет не так-то просто.<sup>[3]</sup>

#### Норвегия

Норвежской компании AkerSolutions приобрела патент Раббии (Rubbia) на использование ториевого топливного цикла, и специалисты которой в настоящее время занимаются разработкой малогабаритного энергетического ториевого реактора на основе ускорителя протонов. Успешная реализация этого проекта, оцениваемого в 1,8 миллиардов долларов, может привести к созданию сети миниатюрных подземных реакторов, вырабатывающих по 600 МВт энергии каждый. Малый размер этих реакторов обуславливает то, что на обеспечение его безопасности и поддержания работоспособности будут тратиться существенно меньшие средства, нежели на обеспечение и обслуживании крупногабаритных атомных электростанций.

Идея и патент технологии использования тория в качестве топлива для реакторов на основе ускорителей протонов принадлежит Нобелевскому лауреату Карло Раббии (CarloRubbia), бывшему директору CERN. Малогабаритный ускоритель частиц вырабатывает луч протонов, которые бомбардируют мишень из тяжелого металла, выбивая при этом свободные нейтроны. Торий является лучшим вариантом материала этой мишени, он способен выделить достаточно много нейтронов при попадании в него одного высокоэнергетичного нейтрона.<sup>[6]</sup>

Институт Энергетических технологий IFE проводит испытания топлива для норвежской компании «ThorEnergy». Подготовка к проведению испытаний осуществлялась в течение длительного времени и по предварительным данным проект затянется на пять лет. В этот период главной целью эксперимента является обеспечение безопасности производственного процесса. Результаты, полученные по окончании проекта, заложат основу для последующего использования тория в атомной промышленности.

Топливо, запатентованное для компании «ThorEnergy», состоит из 90% тория и 10% плутония, и, следовательно, отличается от традиционного уранового топлива. Проведенные исследования показывают, что запасы тория в районе рудного поля Фенсфелте могут дать в сотни раз больше энергии, чем все расположенные на континентальном шельфе Норвегии месторождения нефти и газа. Отчет, представленный норвежской организацией «ThoriumThinkTank», также показал вселяющие оптимизм результаты. По данным доклада, Норвегия обладает одним из крупных месторождений тория в мире, и предполагается, что в районе Фенсфелте находятся залежи 56,000 -675,000 тонн этого радиоактивного элемента.

Программа эксперимента рассчитана на пять лет. Для эксперимента германский институт трансураниевых элементов изготовил восемь таблеток из смешанного торий-плутониевого топлива. Для следующих стадий экспериментальной программы предполагается, что в Великобритании будут изготовлены "полностью прототипные таблетки" из такого топлива.<sup>[7]</sup>

Из сообщения института IFE, в котором расположен исследовательский реактор HBWR, становится ясным - к этой программе действительно применимы слова "впервые в истории". Впервые в истории институт IFE выполняет заказ по облучению топлива для норвежского клиента.<sup>[8]</sup>

#### Преимущества ториевого цикла<sup>[4]</sup>

1. Торий в 3...4 раза более распространён в земной коре элемент, чем уран.
2. Природный торий состоит из одного изотопа и его вовлечение в топливный цикл в отличие от урана не требует трудоёмкого разделения изотопов.

3. Торий имеет некоторые более привлекательные ядерные свойства по сравнению с ураном (резонансный интеграл - среднее сечение по промежуточным энергиям нейтронов составляет треть от такового для урана -238 и т.п.). Поэтому ториевое топливо можно использовать в тепловом бримерном реакторе.

4. Ториевые топлива обладают и некоторыми благоприятными физическими и химическими свойствами, улучшающие эксплуатацию реактора. По сравнению, например, с наиболее распространённым реакторным топливом на основе диоксида урана (UO<sub>2</sub>), диоксид тория (ThO<sub>2</sub>) имеет более высокую температуру плавления и, в отличие от диоксида урана, не склонен к дальнейшему окислению.

5. Поскольку U-233, произведенный в ториевых топливах неизбежно загрязнен U-232, то это ядерное топливо в какой-то мере защищает себя от хищений. Радиологическая опасность от таких материалов требует использования дистанционной обработки. Длительная радиологическая опасность обычного используемого ядерного топлива на основе урана определяется плутонием и минорными актинидами. Торий более привлекателен и его применение возможно в смешанном оксидном (MOX) топливе, когда достигается уменьшение накопления трансуранов.

7. В отличие от плутония, U-233 может быть легко денатурирован путём смешения его с природным или обеднённым ураном.

8. Ядерные реакторы на ториевом топливе более безопасны, чем на урановом, поскольку ториевые реакторы не обладают запасом реактивности. Поэтому никакие разрушения аппаратуры реактора не способны вызвать неконтролируемую цепную реакцию.

9. Отработавшие ТВЭЛы не нуждаются в радиохимической переработке, что значительно снижает риск загрязнения среды;

10. Снимается проблема накопления плутония, а, следовательно, и его распространения (в виде оружия);

11. Не требуется создавать новых реакторов, а достаточно модернизировать существующие под загрузку ТВЭЛы с новым топливом;

12. Ториевые реакторы обладают повышенной внутренней ядерной безопасностью. Сплавы тория с небольшими добавками оружейного урана и плутония в ядерном отношении безопасны и не требуют специальных мер при хранении. Они опасны только в радиационном отношении, однако это их свойство может служить дополнительной гарантией от хищения

Недостатки ториевого цикла<sup>[4]</sup>

1. Торий - рассеянный элемент, не образующий собственных руд и месторождений.

2. Вскрытие монацита - процесс намного более сложный, чем вскрытие большинства урановых руд. Производство тория затруднено. Поэтому торий и его соединения дороже аналогичных продуктов на основе урана.

3. Из-за плохих механических свойств тория, из него невозможно изготовить какие-либо изделия точной формы.

4. В отличие от урана, естественный торий не содержит никаких делящихся изотопов; чтобы достигнуть критичности необходимо все равно использовать (хотя бы на начальном этапе) делящийся материал: уран-235 или плутоний.

5. При использовании тория в открытом топливном цикле для достижения нейтронной эффективности необходимы высокие степени выгорания. (Хотя выгорание диоксида 170 000 МВт·сут/т в реакторе FortSt. VrainGeneratingStation и

было глубоким, тем не менее, трудно достигнуть высоких степеней выгорания в легководных реакторах, т.е. в основных существующих реакторах современной атомной энергетики). Если твёрдый торий используется в закрытом топливном цикле, в котором U-233 подвергается переработке, то интенсивная радиация (жёсткое  $\gamma$ -излучение с энергией до 2 МэВ) обуславливает необходимость дистанционного управления всеми операциями топливного цикла, что увеличивает затраты по сравнению с урановым топливным циклом.

7. В сравнении с существующими прекрасно отлаженными методами переработки уранового топлива подобная технология для тория - все еще разрабатывается.

8. Несмотря на воздействие вредного U-232, США, по-видимому, испытали бомбу на основе U-233. Поэтому переход на ториевую энергетику не снимает проблемы распространения атомного оружия.

9. Хотя ториевое топливо производит намного меньше долгоживущих трансуранов, чем топливо на основе урана, некоторые долгоживущие актиниды оказывают длительное радиологическое воздействие, особенно Pa-231.

10. Можно сделать обобщающий вывод, что цикл тория просто дороже уранового. К тому же он весь слабо проработан.

### **Размножающие свойства разных видов топлива в ячейке реактора ВВЭР-1000**

Рассмотрим возможность использования тория в тепловых реакторах типа ВВЭР. Для этого сравним размножающие (нейтроны) свойства ячеек этого реактора с ториевым топливом.

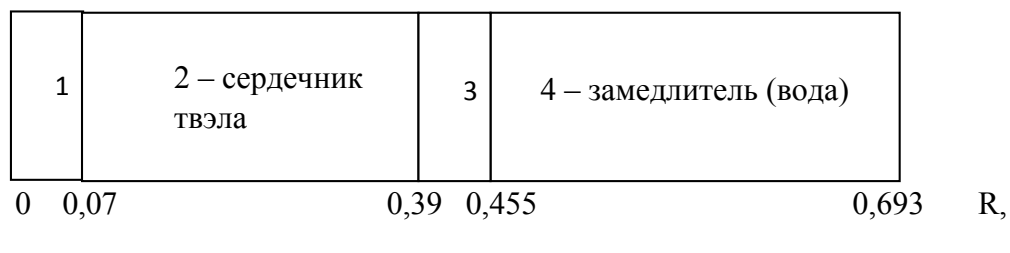
Для реализации ториевого топливного цикла необходимо использовать традиционные делящиеся изотопы урана и/или плутония. В качестве таковых можно выбрать:

- уран с высоким значением обогащения;
- оружейный плутоний;
- энергетический плутоний, извлекаемый из облученного ядерного топлива с большим выгоранием.

В качестве топливной композиции можно выбрать:

- традиционные диоксиды урана, плутония и тория;
- перспективные нитриды (карбиды) этих нуклидов, имеющие существенно более высокую плотность, чем диоксиды.

Возьмем элементарную ячейку реактора ВВЭР-1000 следующего вида: расчетная модель представляет собой бесконечную по высоте элементарную ячейку водородного реактора, состоящую из ТВЭЛа и окружающего его водяного теплоносителя. Реальная шестигранная ячейка при расчете заменяется на эквивалентную цилиндрическую, площадь поперечного сечения которой равна площади реальной ячейки.



Сердечник твэла (зона 2) внешним радиусом 0,39 см имеет внутреннее отверстие диаметром 0,07 см (зона 1). Зона 3 описывает оболочку твэла, зоны 4 и 5 представляют водяной теплоноситель (и замедлитель).

Оболочка твэла реактора ВВЭР-1000 изготовлена из циркониевого сплава с внешним диаметром 0,91 см и толщиной 0,65 см. Топливная таблетка из двуокиси урана имеет внешний диаметр 0,78 см и осевое отверстие диаметром 0,14 см. Шаг расстановки твэлов – 1,275 см.

Материальный состав базового варианта твэлов был представлен двуокисью урана с плотностью 10,5 г/см<sup>3</sup> и с обогащением 4,5 % по <sup>235</sup>U. Оболочка твэлов – циркониевый сплав с 1% ниобия. Плотность воды соответствовала давлению 16 МПа и температуре 300°С.

Нейтронно-физические расчеты проводились с помощью одномерной ячеечной программы WIMS-ANL с 69-групповой библиотекой ANL (WIMSD-5 с библиотекой ENDF/B-VI.7). Уточняющие расчеты будут проводиться по трехмерной прецизионной программе MCU-PTR.

Расчёт в программе WIMS-ANL показал, что наибольшую энерговыработку дают следующие виды топлива: смесь оксидов оружейного плутония и тория (PuO<sub>2</sub>(O)+ThO<sub>2</sub>), нитридное топливо – смесь нитрида плутония и нитрида тория (PuN+ThN), смесь оксида урана с 90% обогащением (UO<sub>2</sub>(90%)+ThO<sub>2</sub>) и смесь оксидов энергетического плутония и тория (PuO<sub>2</sub>(E)+ThO<sub>2</sub>).

#### **Выводы**

В результате проделанной работы на данном этапе был произведён сбор тематической информации, анализ преимуществ и недостатков ториевого топлива, планируемых способов использования тория для реакторов в разных странах и способы реализации ториевого цикла, проведён предварительный расчёт наиболее выгодных видов топлива, содержащих торий.

Расчёт в программе WIMS-ANL показал, что наибольшую энерговыработку дают следующие виды топлива: смесь оксидов оружейного плутония и тория (PuO<sub>2</sub>(O)+ThO<sub>2</sub>), нитридное топливо – смесь нитрида плутония и нитрида тория (PuN+ThN), смесь оксида урана с 90% обогащением (UO<sub>2</sub>(90%)+ThO<sub>2</sub>) и смесь оксидов энергетического плутония и тория (PuO<sub>2</sub>(E)+ThO<sub>2</sub>).

В дальнейшем работа будет связана с оценкой эффективности этих видов топлива с помощью программы MCU-PTR и уточнением технических и габаритных параметров малогабаритного реактора, работающего на тории.

#### **Список литературы:**

1. Торий в ядерных реакторах : физика, технология, безопасность. Шаманини И. В., Кошелев Ф. П., Ухов А. А. Учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2001  
Индия строит ториевый ядерный реактор. Электронный ресурс. URL: <http://geektimes.ru/post/15-457/>(Дата обращения 17.01.2014г.)
2. Инновации. Ядерные реакторы на тории Электронный ресурс. URL: [http://world.lib.ru/w/wasilij\\_i\\_p/txt-4-.shtml](http://world.lib.ru/w/wasilij_i_p/txt-4-.shtml). (Дата обращения 17.01.2014г.)
3. Разработка миниатюрных ториевых реакторов может избавить мир от нефтезависимости – Электронный ресурс. URL:[energy/1-0--razrabotka-miniaturnyx-torievyx-reaktorov-mozhet-izbavit-mir-ot-neftezavisimosti.html](http://energy/1-0--razrabotka-miniaturnyx-torievyx-reaktorov-mozhet-izbavit-mir-ot-neftezavisimosti.html) (Дата обращения 20.11.2014г.)

4. Э. Гревес: Ториевые реакторы на расплавах солей. Электронный ресурс. URL: [http://www.youtube.com/watch?v=4MEpkF\\_5qVQ&feature=youtu.be](http://www.youtube.com/watch?v=4MEpkF_5qVQ&feature=youtu.be) (Дата обращения 24.11.2015г.)
5. В Норвегии построили первый ядерный реактор, работающий на тории – Электронный ресурс. URL: <http://the-clu.com/2013/07/08/1-0-5> (Дата обращения 01.12.2014г.)
6. Торий-плутоний по-норвежски – Электронный ресурс. URL: <http://www.atomic-energy.ru/smi/2013/07/10/42724> (Дата обращения 01.12.2014г.)
7. Ториевый реактор в Норвегии – Электронный ресурс. URL: <http://publicatom.ru/blog/energy/5817.html> (Дата обращения 01.12.2014г.)

### **Конденсационные электростанции, теплоэлектроцентрали: проблемы и перспективы**

Косицын А.А., Громилова О.В., Мустафина А.Р.,  
[Kosicyn.aleksand@gmail.com](mailto:Kosicyn.aleksand@gmail.com)

*Научный руководитель: Злобина И.В. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»*

Большая часть электроэнергии мира вырабатывается на тепловых электростанциях (ТЭС), несмотря на то, что для всех ТЭС характерно использование невозобновляемых источников энергии, что является их главным недостатком.

Конденсационные электростанции (КЭС) составляют основную часть предприятий теплоэнергетики, поэтому их часто так и называют ТЭС [1].

К их отрицательным сторонам с экологической точки зрения относятся интенсивное загрязнение атмосферы на относительно небольшой территории (к тому же на КЭС чаще используют низкосортный высокозольный уголь, что усугубляет ситуацию) и истощение природных богатств (ценного органического сырья).

Немаловажное значение имеют также экономические показатели. КЭС характеризуются низким КПД (30-35 %); сильной привязанностью к источникам топлива, т.к. перевозить некачественный уголь (с содержанием углерода около 30 %) невыгодно, поэтому его сжигают на местах добычи, а транспортируют уже электроэнергию; удаленностью от потребителя (большинство месторождений угля находится далеко от центров экономики - главного потребителя электроэнергии, а имеющиеся близ промышленных центров ресурсы давно исчерпаны); потерями электроэнергии при транспортировке.

КЭС характеризуются равномерной выработкой энергии независимо от природных условий, сезонов года и времени суток, что является важным качественным показателем, особенно с учетом происходящих изменений климатических условий. Как правило, конденсационные электростанции находятся удаленно от потребителя, что способствует загрязнению атмосферы в малонаселенных районах, где мало других источников загрязнения. Это удовлетворяет принципу равномерности распределения отходов и способствует