

Целесъобразност на затворения ядрен горивен цикъл

маг. инж. Ивайло Найденов

Въведение

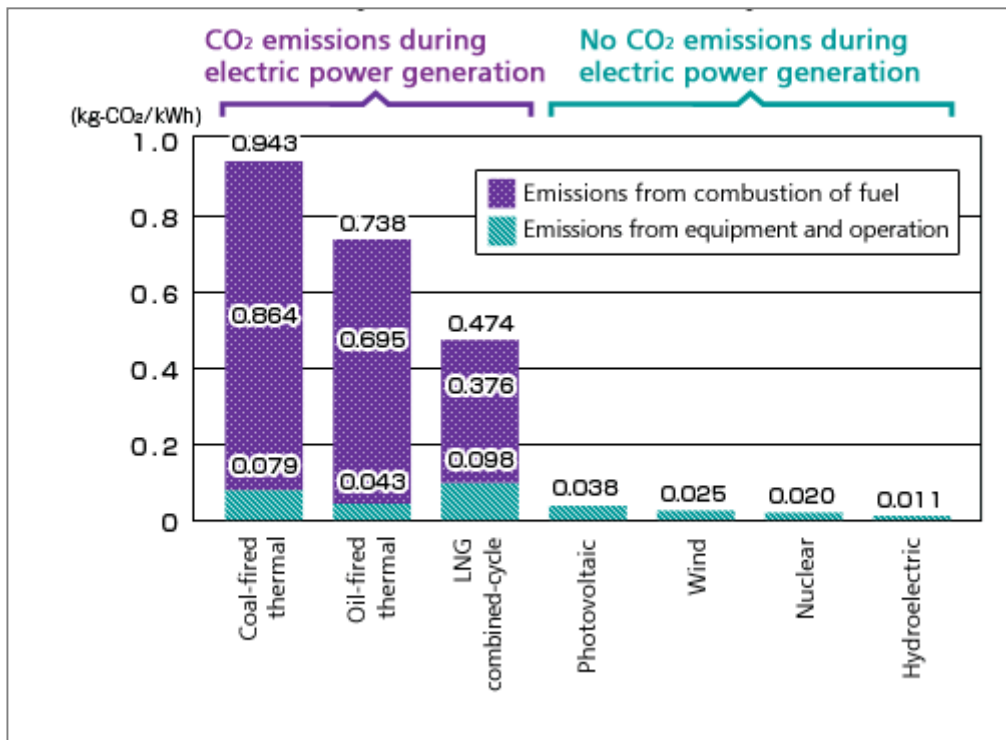
Въпреки негативното влияние върху ядрената енергетика на аварията от март 2011 г. в ЯЕЦ „Фукушима – Даиичи“ в Япония, перспективите пред развитието на ядрената енергетика са по-скоро положителни. Много от страните експлоатиращи ядрени електроцентрали провеждат програми за удължаване на експлоатационния срок на реакторите си, имат проекти за изграждане на нови ядрени мощности или са в процес на изграждане на първите си ядрени реактори.

Сред страните, които смятат да изградят и оперират за първи път ядрени мощности са Турция, Виетнам, Беларус и Обединените арабски емирства. Проекти или нови изграждащи се електроцентрали има в Русия, САЩ, Финландия, Франция, Индия и Китай. Сред страните, които имат програма за удължаване на експлоатационните срокове на ядрените си мощности, както и планове за изграждане на нови блокове, е България, а в региона, освен Турция, желание за по-нататъшно развитие на ядреноергийния си парк имат Словения, Чехия, Словакия, Унгария, Румъния и Полша.

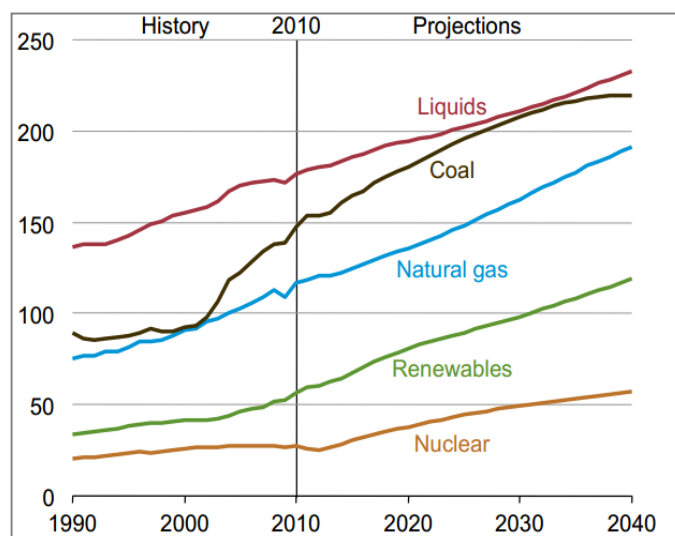
Тези процеси са продиктувани основно от два аспекта на ядреното електропроизводство – ниската въглеродна интензивност на електропроизводството и положителното въздействие върху енергийната независимост. На фиг. 1. е илюстрирана въглеродната интензивност на различни методи за производство на електроенергия. От нея се вижда, че ядрената енергетика е сред най-благоприятните методи за производство на електричество по този показател. Положителните аспекти на ядрената енергетика по отношение на енергийната сигурност се дължат основно на три фактора:

- стабилност на цените на уранов концентрат на световните пазари, особено в сравнение с цените на петрола и природния газ;
- нисък дял на горивните разходи в себестойността на произведената електроенергия – при 5% дисконтов фактор, дялът е 16%, а при 10% дисконтов фактор, дялът е 9,5% (с включени разходи за преработка и съхранение на ОЯГ), докато за въглищни ТЕЦ този компонент може да достигне 45%, а при газови ТЕЦ – дори 90%;
- възможността на площадката на ЯЕЦ да се съхранява свежо гориво, достатъчно за няколко горивни кампании, намалява риска от прекъсване на доставките при непредвидени обстоятелства и дава възможност да се обезпечи енергопроизводство при кризисни ситуации.

Поради гореизброените фактори, както и поради нарастващата нужда от енергия в световен мащаб, редица енергийни изследователски институти и големи енергийни концерни имат благоприятни прогнози за развитието на ядрената енергетика в световен мащаб. На фиг. 2. е представена прогнозата за ръста на световното енергийно потребление на Енергийната информационна служба на САЩ (Energy Information Administration). Според тези прогнози ядреното електропроизводство в света ще достигне почти 5 500 TWh през 2040 г. в сравнение с 2 620 TWh през 2010 г.



Фиг. 1. Специфични емисии на CO₂ според източника, kg/kWh

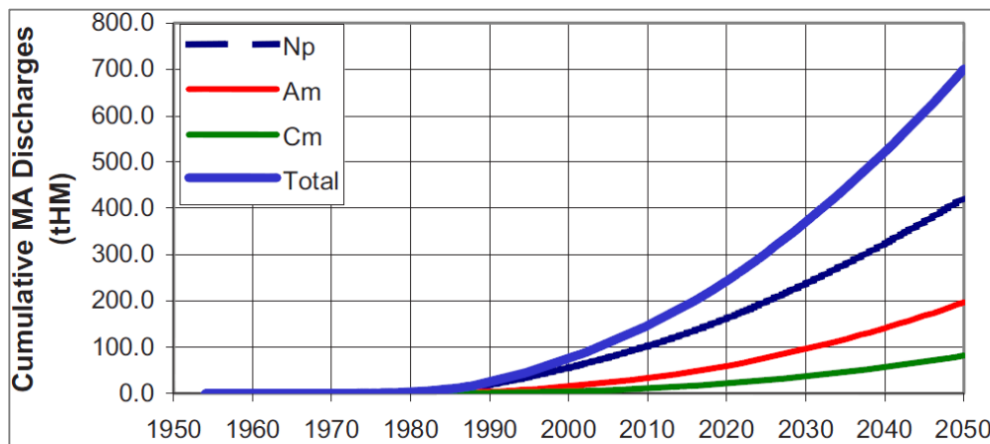


Фиг. 2. Прогнозен ръст на световното енергийно потребление до 2040 г. по енергоизточници, EIA, квадрилиони BTU (1 квадрилион BTU = 293 TWh)

Натрупване на отработено ядрено гориво

Един от основните проблеми, стоящи пред ядрената енергетика е увеличаващото се количество отработено ядрено гориво. В нито една страна по света няма изградено геоложко хранилище за постоянно съхранение на ОЯГ. Дългосрочната радиоактивност на ОЯГ ($T_{1/2}$ на ^{239}Pu е 24 100 години, а на ^{241}Am – 432,2 години) поставя високи изисквания пред геоложките хранилища – да не се нуждаят от поддръжка, да осигурят изолация от околната среда и човешка намеса в продължение на хиляди години и др. В резултат се появяват изисквания за по-ефективно управление на ОЯГ и РАО. Справянето с проблемите в задния край на ядрения горивен цикъл се смята за изключително важно, за да се гарантира дългосрочното развитие на ядрената енергетика.

Типичен леководен реактор (LWR) с електрическа мощност 1000 MW произвежда около 20-30 t ОЯГ годишно. Основата на притесненията за околната среда се крие в това дали вредните компоненти могат да бъдат изолирани от биосферата за поне няколко десетки хиляди години. По-голямата част от масата на ОЯГ (обикновено над 98,5%) от промишлени LWR е уран и краткоживущи продукти на делене, които не представляват радиологична заплаха. Около 0,4 тегловни процента от ОЯГ са дългоживущи продукти на делене – цезий, стронций, технеций и йод. Значителни притеснения поставят около 1 тегловен процент от ОЯГ – изотопите на плутония и низшите актиниди. Основните причини за това са дългосрочната радиотоксичност, проблеми, свързани с остатъчното топлоотделяне, както и рискове, свързани с неразпространението на ядрени материали.



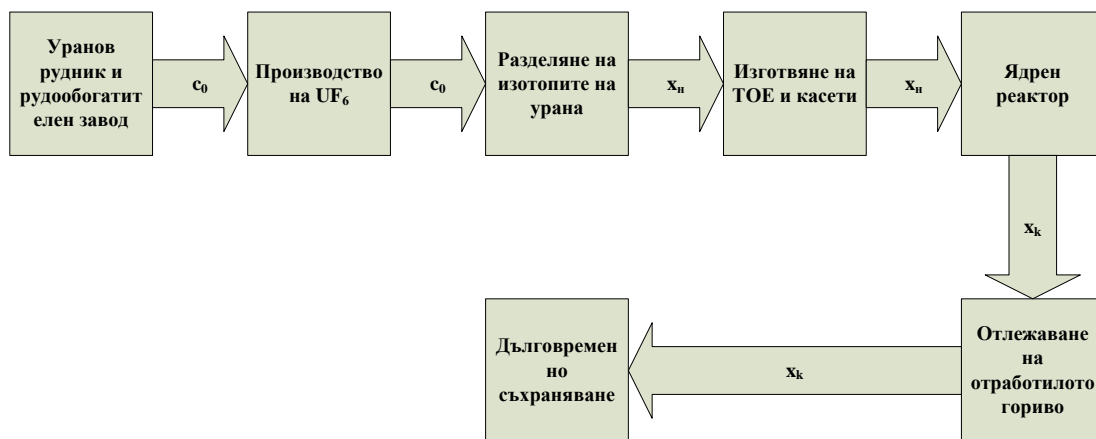
Фиг. 3. Оценка на натрупаните количества на актинидите в световен мащаб. Изт. МААЕ

Типове горивни цикли

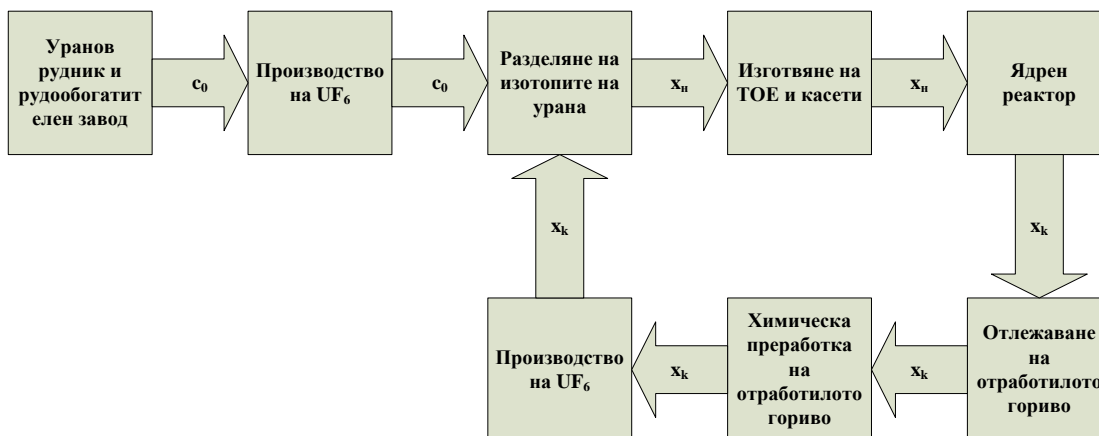
Съществуват два вида ядрени горивни цикли – *затворен* и *отворен*. При първия, всички дялящи се и възпроизвеждащи материали в отработеното ядрено

гориво се извличат чрез радиохимична преработка и се рециклират, т.е. връщат се в реактора за допълнителен добив на енергия. Радиоактивните отпадъци, останали за съхранение, съдържат само продукти на делене и низши актиниди, т.е. материали, които не могат да се използват в технологията. След известно съхранение те се погребват окончателно. В отворения цикъл, горивото се използва само веднъж в реактора и отработеното ядрено гориво се погребва окончателно без значение колко дялящ се и възпроизвеждащ материал има в него. В действителност съществуват няколко смесени варианта като частично рециклиране на ОЯГ, рециклиране на целия дялящ се материал, рециклиране на всички актиниди и дори на продуктите на делене.

Например отворен цикъл се прилага в САЩ не поради технологични или икономически съображения, а по политически причини с цел да се възпрепятства разпространението на ядрен материал. Изборът на отворен или затворен цикъл зависи силно от стратегията на дадената страна и се прави въз основа на технико-икономически оценки, стратегията за управление на радиоактивни отпадъци и отработено ядрено гориво, технологичния капацитет, регулаторната рамка и политическите решения.



Фиг. 4. Отворен горивен цикъл за реактори с топлинни неутрони



Фиг. 5. Затворен горивен цикъл за реактори с топлинни неутрони

Количествени показатели на горивните цикли

1. Необходимост от природен уран

Необходимостта на ЯЕЦ от обогатен уран, във вид на готови ТОЕ и касети, е равна с точност до 1% на производителността на заводите за производство на ТОЕ. Нужното количество обогатен уран, във вид на UF_6 , се получава в уранообогатителните заводи, като за суровина се използва природен уран.

Необходимостта от природен уран се пресмята съгласно израза:

$$G_x = \frac{N_{ел}^{бр} \cdot T_k \cdot \bar{\varphi}}{B \eta_{ЯЕЦ}^{бр}} = \frac{W_{бр}}{B \eta_{ЯЕЦ}^{бр}},$$

където:

$W_{бр}$ - дадено количество изработена енергия; \bar{B} - специфично енергоизработване и $T_k \bar{\varphi}$ - ефективно време на използване на проектната мощност.

За определяне на производствените разходи на електроенергията от ЯЕЦ, често е удобно да се използва специфичния разход на ядрено гориво за единица произведена електроенергия. Специфичният разход е:

$$g_{c_0} = \frac{1}{B \eta_{ЯЕЦ}^{бр}} \cdot \frac{x_n - y}{c_0 - y}$$

Този израз е валиден при отворен цикъл без рециклиране на ядреното гориво.

При затворени цикли с връщане на регенерираното гориво за повторно използване, специфичният разход на природен уран е:

$$g_{c_0} = 1 - KBЦ$$

2. Коефициент на връщане на горивото в цикъла (KBЦ).

Използва се, за да се оцени каква част от горивото се връща обратно в горивния цикъл и се използва отново. Смисълът на този коефициент е да даде оценка за реалното количество ОЯГ, което се връща обратно в ядрения горивен цикъл. Той представлява отношението на количеството на горивото, връщано в реактора след химическата преработка, спрямо първоначално зарежданото в ядрения реактор количество гориво, приведени към еднакво обогатяване по $^{235}U - x_n$.

$$KBЦ = \frac{G_x^{бр}}{G_x}$$

КВЦ зависи главно от изменението на дълбочината на изгаряне α . За различните видове реактори КВЦ е в рамките на 0,2 – 0,5 %. От стойността на КВЦ зависи производството на уранодобивните предприятия, производството на UF_6 и мощностите на разделителните заводи.

Необходимост от въвеждане на затворен цикъл

Понастоящем ежегодно от ОЯГ на енергийните реактори се извеждат около 10 500 тона ТМ. Това превръща ОЯГ в най-значимия постоянно растящ източник на цивилни радиоактивни материали и поради тази причина се появява необходимостта от адекватното му управление. Към началото на 2004 г. общото количество натрупано ОЯГ е почти 268 000 т ТМ, като от тях 90 000 т ТМ са преработени. Световният потенциал за промишлена преработка на ОЯГ е около 5 500 т/год. Оценките на МААЕ са, че до 2020 г. общото количество на генерирано ОЯГ ще е приблизително 445 000 т ТМ.

Безопасното и сигурно управление на нарастващите количества ОЯГ има значително влияние върху бъдещото устойчиво развитие на ядрената енергетика. Съществуващите преработващи съоръжения са значително модернизирани като се въвеждат нови технологии, за да се посрещнат новите изисквания за намаляване/елиминиране на вторичните отпадни потоци и намаляване на риска от нерегламентирано разпространение на ядрени материали. Стремежът е новите разработки в областта да засягат едновременно решението на множество проблеми:

- Сигурност на енергийните доставки;
- Въздействие върху околната среда;
- Икономическа целесъобразност;
- Неразпространение на ядрени материали;
- Ядрена безопасност;
- Ядрена сигурност.

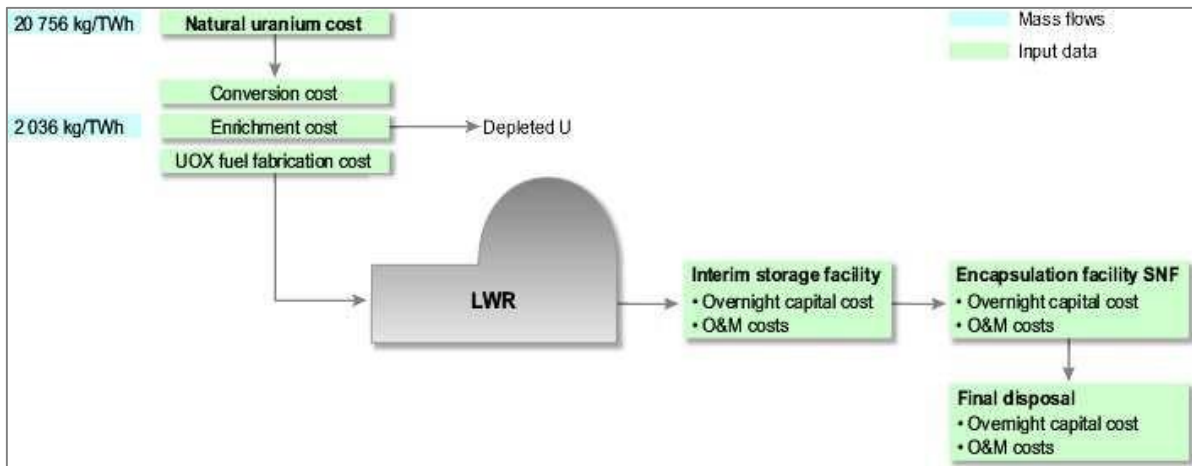
Изброените по-горе точки са ключовите фактори, определящи бъдещото развитие на ядрената енергетика

Сегашните проучвания показват, че този обем може да бъде намален още повече чрез оптимизиране на процесите на преработка и управлението на ВАО. Разходите по преработката зависят от много фактори, но оценки на Агенцията за ядрена енергетика на ОИСП (OECD Nuclear Energy Agency) от 1999 г. дават стойност от порядъка на 720 EUR/kgU. Тези разходи трябва да се сумират с останалите разходи в задния край на ЯГЦ и да се сравнят с тези за директно погребване. Трябва да се отчете и факта, че чрез преработката на ОЯГ се спестяват разходи за добив и обогатяване на уранова руда, както и се намаляват разходите за изотопно обогатяване. **Основният стимул за насърчаване на преработката на ОЯГ от LWR и използването на MOX са спестяванията на първоначален ресурс и намаляването на разходите за изотопно обогатяване на свежия уран.**

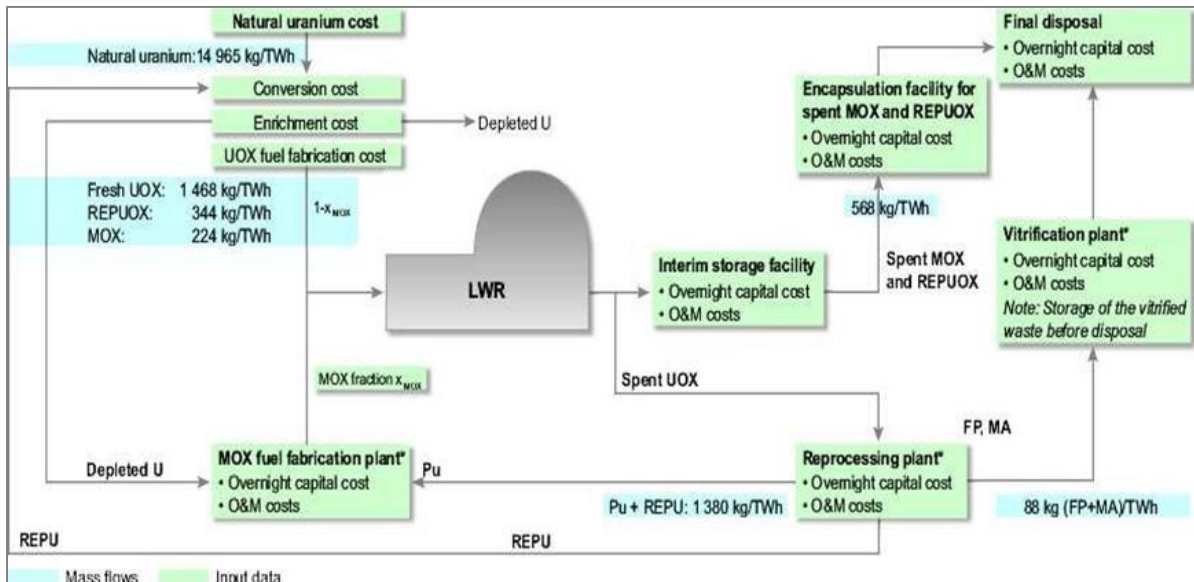
Стратегии за задния край на горивния цикъл

Понастоящем от Агенцията за ядрена енергия на Организацията за икономическо сътрудничество и развитие разглеждат три основни стратегии за задния край на горивния цикъл:

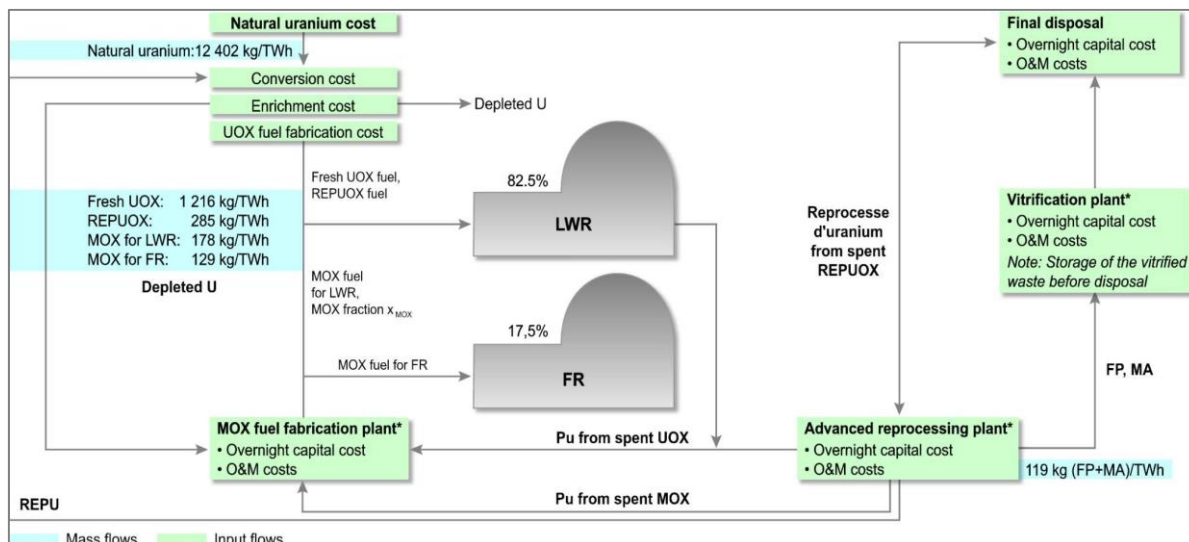
1. Отворен горивен цикъл с директно погребване на ОЯГ (фиг. 6.);
2. Затворен горивен цикъл с еднократно рециклиране на МОХ в леководни реактори и погребване на вторичното ОЯГ (фиг. 7.);
3. Затворен горивен цикъл с многократно рециклиране на гориво от регенерирани уран и плутоний със съвместна работа на леководни реактори и реактори-размножители на бързи неутрони (фиг. 8.).



Фиг. 6. Отворен горивен цикъл



Фиг. 7. Затворен горивен цикъл с еднократно връщане на горивото



Фиг. 8. Затворен горивен цикъл с многократно връщане на горивото

Техническа целесъобразност на затворения цикъл

Освен оползотворяването на енергийното съдържание на рециклируемите материали, друга потенциална полза от рециклирането е намаляването на радиоактивността на ОЯГ. Въпреки че количеството РАО е изключително малко в сравнение с отпадъците генерирани от други индустриални процеси, обществото е загрижено за риска, произтичащ от факта, че ОЯГ остава радиоактивно стотици години след извеждането му от активната зона. Изборът за или против преработката на ОЯГ често е диктуван от политически мотиви. Тези фактори ще продължат да играят съществена роля при развитието на нови подобрени горивни цикли като например многократно рециклиране с отделяне и трансмутация на актинидите. Фактор с нарастващо значение наред с подобряването на управлението на урановите ресурси, е намаляването на токсичността и обемите на РАО, генерирани в процеса на преработка и рециклиране.

Понастоящем, без реактори размножители на бързи неутрони, рециклирането на плутония, извлечен от ОЯГ на леководни реактори може да се осъществи само чрез използване на смесено оксидно гориво в LWR. Рециклирането на плутоний посредством употребата на MOX намалява радиоактивността на вторичното ОЯГ, ако то не отиде за преработка. Многократната преработка и рециклиране може да намали радиоактивността на ОЯГ между 3 и 10 пъти. Теоретично, отделянето на урана и плутония от останалите актиниди и продукти на делене, може да доведе до десетократен спад на радиоактивността. На практика такова намаляване може да се постигне след десетилетия и при условие, че загубите при преработка са незначителни.

Сегашната преработка допринася значително за намаляването на обемите РАО. Докато всеки тон ОЯГ представлява около $1,5 \text{ m}^3$ ВАО, то след преработка остават по-

малко от 0,5 m³, включително 0.115 m³ остъквени ВАО и 0,35 m³ средноактивни РАО, като преди погребването е възможно обемът да се намали още. Въпреки това, без значение какъв горивен цикъл се използва, винаги ще има нужда от финално хранилище за остатъчните РАО.

От всички възможности за рециклиране на дялящ материал, повторната употреба на уран и плутоний, извлечени от ОЯГ е технологично най-зряла и има най-големия натрупан опит в промишлен мащаб. Въпреки че рециклирането на натрупаните складове от преработени уран и плутоний би имало скромно изражение по отношение на получен енергиен ефект (около 70 000 тона еквивалент природен уран, което би задоволило световното търсене за една година), демонстрирането на целесъобразността на рециклирането в промишлен и търговски мащаб е важно за бъдещото развитие на тези технологии. През изминалите десетилетия много заводи за преработка на ОЯГ работят на конкурентен принцип. Освен това те имат различно географско разположение и използват разнообразна технологична база.

В световен мащаб при преработката на ОЯГ, основно от LWR, но и от AGR във Великобритания, са произведени 45 000 тона преработен уран под формата на триуранов октаоксид (уранов концентрат). Успешно е демонстрирано и рециклирането в промишлен мащаб на преработен уран, извлечен от ОЯГ от реактори на бързи неутрони. Малка част от такъв материал е преминал изотопно обогатяване в центрофужни инсталации в Русия и Холандия. Въпреки демонстрираната практичност на процеса, ще са необходими нови заводи с голяма производителност, за да се извърши конверсията на триурановия октаоксид (U₃O₈) в UF₆ преди да се премине към изотопно обогатяване.

Твърде е възможно бъдещето на рециклирането на преработен уран да се определи както от икономически, така и от стратегически фактори. От гледна точка на управлението на природните ресурси, използването на природен уран премахва нуждата от използването на част от добиваните количества природен уран като елиминира и натрупването на минни отпадъци при добива и обогатяването на рудата. Понастоящем запасите от преработен уран са малки, но напред е възможно да се генерират до 4 000 тона уран годишно със съдържание на ²³⁵U между 0,4% и 0,8%.

Това е еквивалентно на между 5% и 10% от световното търсене на уран и представлява производството на голяма уранова мина.

Делящите и възпроизвеждащите материали – уран и плутоний, могат да бъдат рециклирани както в леководни реактори, така и в реактори на бързи неутрони. Прогнозите за ресурсни спестявания, направени на база рециклиране в реактори сегашно поколение са, както следва:

- 5% чрез увеличаване на дълбочината на изгаряне;
- 20% чрез намаляване на съдържанието на ²³⁵U в обеднения уран;
- 20% чрез рециклиране на преработените уран и плутоний от ОЯГ;

- 5-10% чрез подобряване на реактора и ЯЕЦ (използване на по-добри отражатели, повишаване на термичния КПД и др.);
- 5-10% чрез повишаването на производството на дялящи изотопи в реактора.

Вижда се, че рециклирането на уран и плутоний в сегашното поколение ядрени реактори може да намали потреблението на природен уран с до 50%, в сравнение с използването на отворен цикъл. Други начини за намаляване на потреблението на уран включват подобряване на топлинната икономичност на ЯЕЦ, повишаване на коефициента на използваемост на инсталираната мощност, достигане на по-големи дълбочини на изгаряне и др.

От друга страна, рециклирането на дялящи и възпроизвеждащи материали в реактори на бързи неутрони позволява използването на всички налични материали, както и възпроизводство на ядреното гориво в реактора. При този вариант, продуктите на делене ще се премахват от ОЯГ. Тъй като за всеки инсталиран гигават електрическа мощност на FBR са необходими 10 до 15 тона плутоний, плутоният произведен от LWR за целия период на експлоатацията му, би бил достатъчен като стартово гориво за FBR със същата инсталирана мощност. Още повече, уранът, извлечен от ОЯГ на LWR може да захранва FBR със същата мощност в продължение на няколкостотин години.

Сегашните запаси от плутоний и високообогатен уран биха позволили инсталирането на 150 GWe реактори на бързи неутрони, които ще могат да произвеждат електроенергия в продължение на повече от 500 години без да е необходим допълнителен свеж уран. Тази опция обаче ще стане възможна, само ако се разработят технологично зрели и икономически конкурентоспособни реакторни системи на бързи неутрони.

Въвеждането на FBR ще позволи значително повишаване на използваемостта на енергийното съдържание на ядреното гориво, в сравнение с леководните реактори с отворен горивен цикъл. Стойността на мултипликатора зависи от много фактори, включително KB, бързината и степента на въвеждане на FBR и загубите в различните процеси от ЯГЦ.

Икономически показатели на горивните цикли

От икономическа гледна точка стратегиите за управление на ОЯГ и за използването на отворен или затворен цикъл се оценяват по няколко показателя:

- Капиталови вложения в хранилища, радиохимични заводи, съоръжения за третиране на PAO и др.;
- Разходи за извличане на дялящи и възпроизвеждащи материали от ОЯГ;
- Разходи за производство на MOX-гориво;
- Разходи за дообогатяване на регенерирания уран;

- Спестявания от добива на природен уран;
- Разходи за ядрена безопасност и радиационна защита;
- Разходи за поддръжка на съоръженията, особено на геоложките хранилища с дълъг срок на експлоатация и др.

Голяма част от тези разходи са неизвестни или не може да се даде адекватна оценка за пълния им размер на настоящия етап. Тяхната оценка е важна, защото тези разходи биха могли да повлияят на конкурентоспособността на ядрената енергетика в дългосрочен план.

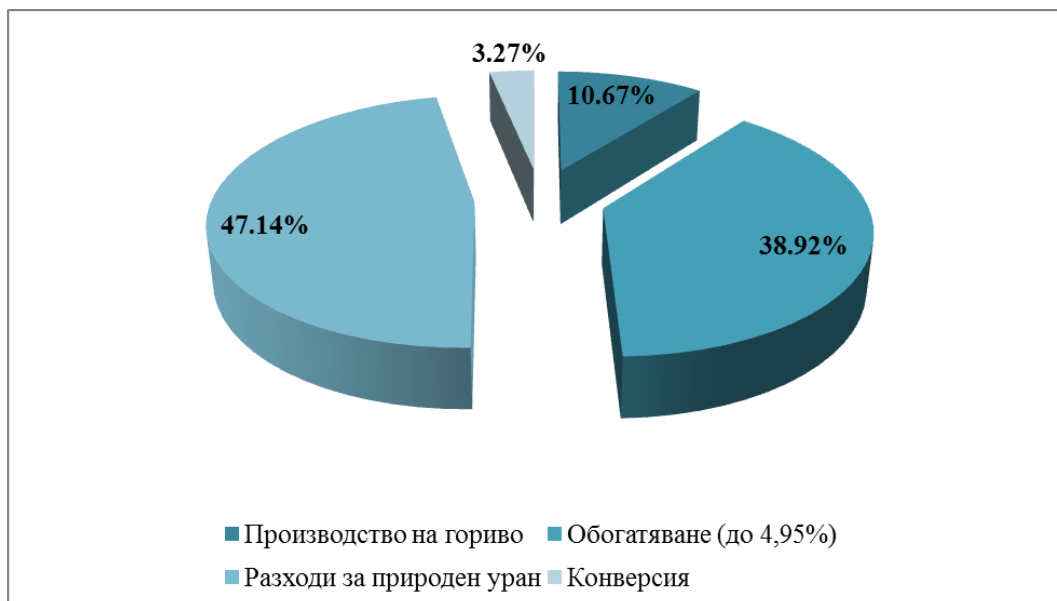
Най-важната оценка, която трябва да се направи е при какви технически (тип експлоатирани реактори, електропроизводство, дълбочина на изгаряне на горивото и др.) и икономически (цени на урановия концентрат, разходи за производство и транспорт на ядреното гориво, цени на други енергоносители, себестойност на рециклираното гориво, цени на електроенергията и др.) условия коя стратегия за управление на ОЯГ е технически и икономически най-изгодна и как това би се отразило на конкурентоспособността на ядреното електропроизводство.

За да се окаже затвореният горивен цикъл конкурентоспособен, то крайният продукт от него трябва да е поне равен по себестойност на природния уран. Тук освен разходите за преработка на материалите и производството на гориво, трябва да се вземат и разходите за изграждане, поддръжане и ззакриване и рекултивация на уранов рудник, капиталовите и експлоатационните разходи за съоръженията от затворения цикъл (радиохимични заводи, хранилища и др.), спестяванията на природни ресурси, разходите по опазване на околната среда и населението (ядрена безопасност, радиационна защита, вредни емисии и др.). Т.е., за да се получи пълна картина би следвало да се вземат предвид не само присъщите разходи на горивния цикъл, но и така наречените външни разходи (*externalities*), които той предизвиква.

И накрая, трябва да се изследва как тези разходи влияят върху себестойността на произведената електроенергия. В следващите таблици и графики са посочени някои основни разходи по ядрения горивен цикъл и влиянието им върху себестойността на електроенергията.

Табл. 1. Разходи на предния край на горивния цикъл

Разход	Дименсия	Стойност
Цена на природния уран	<i>USD/kgU</i>	130,00
Разходи за конверсия	<i>USD/kgU</i>	9,00
Разходи за обогатяване	<i>USD/SWU</i>	140,00
Разходи за производство на UO _x и UO _x от преработен уран	<i>USD/kgU</i>	300,00



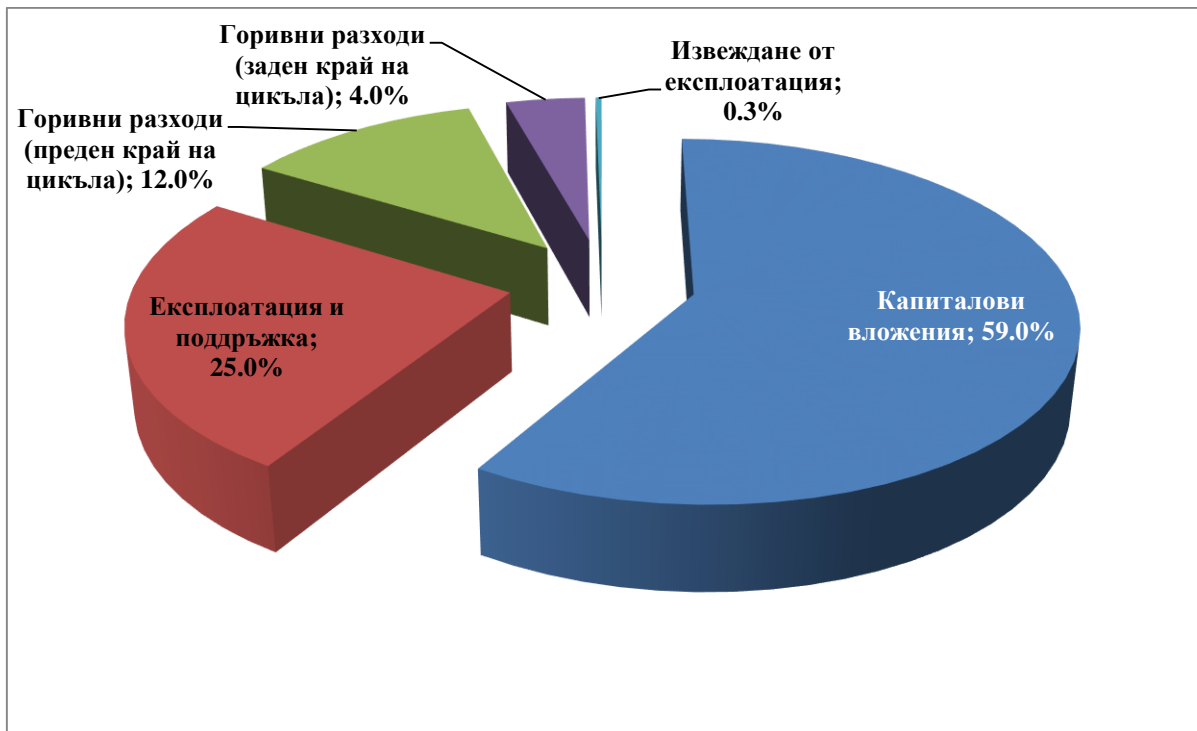
Фиг. 9. Относителен дял на разходите за производство на 1 kg уран

Табл. 2. Осреднени разходи за получаване на 1 kg гориво, прираенени на kg уран. Стойностите са осреднени данни на МААЕ и NEA.

Производство на гориво	USD/kgU	300
Обогатяване (до 4,95%)	USD/kgU	1,094
Разходи за природен уран	USD/kgU	1,325
Конверсия	USD/kgU	92

Табл. 3. Разходи за различни технологии на задния край на горивния цикъл

Технология	Ценови интервал
	USD/MWh
Отделяне на урана от ОЯГ (UREX+)	0,5 - 2,5
Електрохимично разделяне	0,75 - 2,25
Хранилище за ВАО	0,5 - 1,5
Кондициониране на РАО	0,4 - 1,2
Производство на MOX	0,25 - 0,75
Хранилище за Cs/Sr (контролиран разпад)	0,2 - 0,6



Фиг. 10. Структура на себестойността на произвежданата електроенергия от ЯЕЦ при 5% дисконтов фактор

От табл. 3. се вижда, че макар и представени в доверителен интервал, разходите по задния край на затворения горивен цикъл не са значителни. От фиг. 10. Личи ниското влияние на всички дейности по горивния цикъл върху себестойността на енергията – 15% в сравнение с 45-90% при топлоелектрическите централи, в зависимост от използваното гориво.

Заклучение

В заключение може да се каже, че ползите от доброто управление на ОЯГ са многопосочни:

- Намаляване на дългосрочната радиоактивност на горивото;
- Намаляване на обемите на ВАО, които трябва да бъдат погребани окончателно;
- Намаляване на експлоатационните изисквания и размерите на геоложките хранилища;
- Връщане в цикъла на дялящи материали, чието енергийно съдържание може да се оползотвори по-пълно;
- Създава потенциал за спестяване на природни ресурси;
- Създава условия за развитие на ядрена енергетика, базирана на реактори-размножители на бързи неутрони, които използват като гориво отпадъците на сегашната ядрена енергетика.

- Създава възможност за повишаване на ресурсната база на ядрената енергетика;
- Повлиява положително енергийната сигурност и повишава обезпечеността с енергоресурси, чиято цена е сравнително дългосрочно предвидима;
- Въпреки високата капиталова интензивност, може да се допусне, че тези разходи няма да повлияят сериозно върху себестойността на произвежданата електроенергия;
- При рязко увеличаване на ядреноенергийния парк, може да се очаква рязко покачване на цените на природния уран и това да допринесе за конкурентоспособността на затворения горивен цикъл.

Използвана литература

1. The Economics of the Back End of the Nuclear Fuel Cycle, Nuclear Energy Agency, OECD 2013
2. Велев В., К.Филипов, Ядрени горива, ИфоДизайн, С. 2008
3. Advanced Reactor Technology Options for Utilization and Transmutation of Actinides in Spent Nuclear Fuel, IAEA-TECDOC-1626, September 2009
4. Management of Recyclable Fissile and Fertile Materials, Nuclear Energy Agency, OECD 2007
5. Spent Fuel Reprocessing Options, IAEA-TECDOC-1587, August 2008