

# Výměna paliva v rámci odstávky jaderné elektrárny Temelín

**Autoři v článku popisují přípravy a průběh výměny jaderného paliva v rámci plánovaných odstávek. Popisují vybrané úseky „života“ palivové vsázky od jejího návrhu a optimalizace přes její zavezení do reaktoru v rámci výměny paliva, otestování během testů spouštění až po uložení vyhořelého paliva do obalového souboru.**

## Hledání a návrh nové palivové vsázky

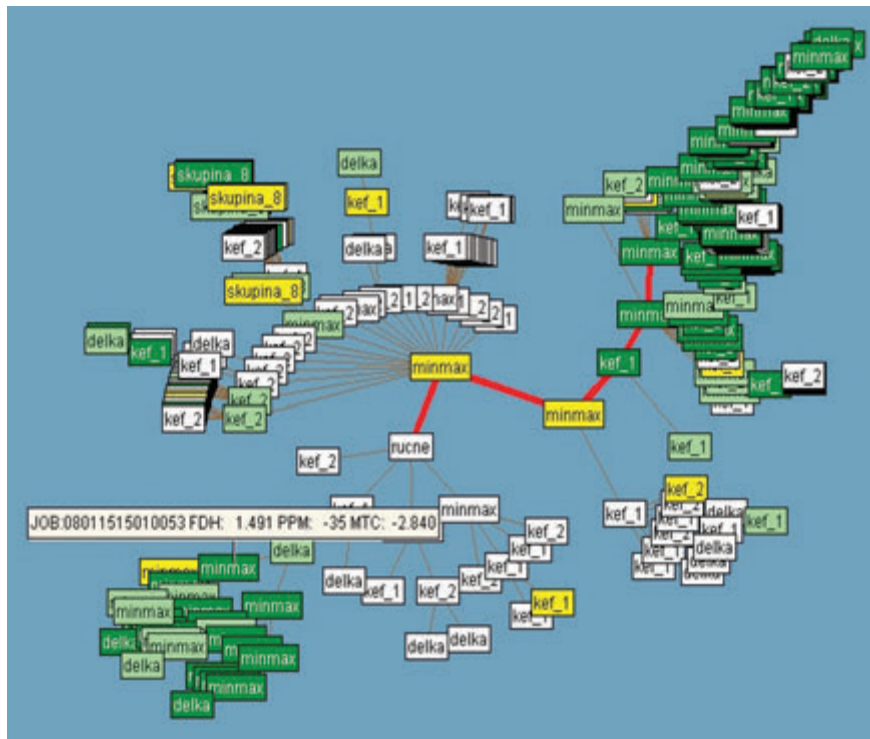
Podle střednědobého plánu výroby je pro každou kampaň jednoho bloku útvarem společnosti ČEZ, a.s. „Projektování a bezpečnostní hodnocení vsázek jaderné elektrárny Temelín“ navržena při neoptimálnějším poměru „vyhořelé palivo/čerstvé palivo“ nová vsázka aktivní zóny reaktoru, která v sobě zahrnuje i výhled na provoz v dalších letech. Jedna kampaň na elektrárně Temelín trvá při trvalém provozu na nominálním tepelném výkonu zpravidla 290 až 320 kalendářních dní. Na konci palivové kampaně je ještě možno zvýšit využití paliva provozem na tzv. teplotním a výkonovém efektu, kdy je při pozvolném snižování teploty a výkonu z paliva uvolněna ještě dodatečná zásoba reaktivity a prodloužena tak celá kampaň o další dny.

Vlastní život jedné palivové vsázky, tedy souboru paliva, které odpracuje danou palivovou kampaň, se začíná více než rok před plánovaným zahájením dané kampaně. V tu chvíli se začíná připravovat plán zavezení aktivní zóny (vsázka).

Oba bloky jaderné elektrárny Temelín pracují v tzv. 4letém palivovém cyklu. To znamená, že při ustáleném provozu elektrárny se počítá s provozem (vyhoříváním) každého palivového souboru v aktivní zóně po dobu čtyř let. Protože však palivové soubory vyhořívají v aktivní zóně nerovnoměrně, je potřeba je každý rok přeskládat a přibližně jedna čtvrtina z celkového počtu 163 palivových souborů v aktivní zóně, a sice těch nejvyhořelejších, je nahrazena palivovými soubory čerstvými. Zpravidla se během odstávky pro výměnu paliva mění podle nového návrhu aktivní zóny 36 až 48 vyhořelých (nejčastěji 42) palivových souborů za čerstvé. Celková hmotnost uranu v aktivní zóně je přibližně 75,5 tuny. Během jedné odstávky se tak do aktivní zóny zaveze přibližně 20 tun uranu v čerstvých palivových souborech.

Vlastní projekt aktivní zóny je souhmem informací o počtu nově zavezených čerstvých palivových souborů a jejich obohacení, a o novém rozmístění jak čerstvých, tak částečně vyhořelých palivových souborů v aktivní zóně. Toto rozmístění je velmi podstatné pro hlavní charakteristiky bloku, a to zejména bezpečnostní, ale i ekonomické. Na palivovou vsázku je kladena celá řada omezení, týkající se rovnoměrnosti rozložení výkonu v aktivní zóně, odezva vsázky na zásahy regulačních orgánů, dostatečná podkritičnost aktivní zóny po odstavení reaktoru, ale i případné chování v abnormálních a havarijních stavech.

Nezanedbatelnou položkou je ekonomika palivové vsázky, kdy vhodným sestavením aktivní zóny (a to jak z hlediska inventáře jaderného paliva, tak i jeho rozmístění) lze snížit obohacení čerstvých palivových souborů nebo dokonce jejich počet. Vzhledem k rostoucím



Schématický diagram, znázorňující postup hledání vhodné palivové vsázky

cenám uranu je pak tento aspekt rozhodně nezanedbatelným.

Výsledkem hledání vhodné palivové vsázky je tzv. kartogram aktivní zóny, tedy pomyslná mapa aktivní zóny, určující, na které pozici se bude v plánované kampani nacházet jaký soubor. Pro nalezení vhodné palivové vsázky se kromě základních výpočetních programů přímo určených pro výpočet jaderných charakteristik paliva používá i celá řada sofistikovaných optimalizačních metod.

Pro tyto účely byl přímo na odboru reaktorové fyziky vyvinut specializovaný software usnadňující optimalizaci hledání vhodné palivové vsázky – viz obrázek 1. Vzhledem k tomu, že z každé palivové

kampaně přibližně tři čtvrtiny pracují i v následující kampani, resp. kampaních, stává se tato úloha tzv. vícecyklovou.

## Bezpečnostní hodnocení nové kampaně a výpočet neutronově-fyzikálních charakteristik aktivní zóny

Po nalezení vhodného kandidáta vsázky se provede tzv. bezpečnostní hodnocení kampaně. V jeho rámci se výpočetně určí celá řada přesně definovaných charakteristik navržené aktivní zóny, a to za přesně určených podmínek. Ověří se jejich soulad s předem definovaným a povoleným rozsahem parametrů. Bezpečnostním hodnocením je potvrzeno,



Manipulace s palivovými soubory ve skladu čerstvého jaderného paliva

že navržená vsázka vyhovuje bezpečnostním analýzám bloku, a že zejména v případě havarijních situací jsou bezpečnostní systémy bloku schopny při navržené zátěži aktivní zóny událost zvládnout podle předem jasně stanovených kritérií.

Dalším krokem je pak výpočet tzv. Neutronově-fyzikálních charakteristik aktivní zóny. Jedná se o jakýsi souhrn všech podstatných parametrů a omezení aktivní zóny, jež využívají především osádky blokové dozory a provozní fyzici, ale i další útvary.

Pro provoz aktuálních kampaní 2012-2013 (tedy kampaní, pro které bylo letos během odstávek vyměňováno palivo) byly navrženy vsázky



Vyvážení aktivní zóny reaktoru

obsahující 43 čerstvých palivových souborů s průměrným obohacením U235 4,3 % v případě prvního bloku (jeden palivový soubor měl obohacení 2,0 %) a v případě druhého bloku obsahující 42 čerstvých palivových souborů, z nichž 36 má obohacení cca 3,7 % U235 a zbylých šest obohacení 4%. Původně plánovaná vsázka kampaně č. 10 druhého bloku měla obsahovat 48 čerstvých palivových souborů. Avšak na základě provozu předchozích vsázek se podařilo tuto přeprojektovat a navrhnout



Obalový soubor Castor® 1000/19 na reaktorovém sále

modifikovanou vsázku, která splňuje všechny bezpečnostní, provozní i výrobní požadavky a obsahuje nakonec pouze 42 čerstvých palivových souborů. „Ušetřených“ šest palivových souborů tak představuje nejen nemalou úsporu v palivových nákladech, ale i snížení produkce vyhořelého paliva.

### Manipulace s palivem

Palivo na elektrárně Temelín v současné době dodává ruská firma TVEL. Vstupní kontrola paliva, která probíhá ve skladu čerstvého paliva na území elektrárny, v sobě zahrnuje kontrolu dopravních kontejnerů, ve kterých je palivo převáženo a po jeho „vybalení“ kontrolu samotných palivových souborů a dalších případně přivezených komponent aktivní zóny (sekundární zdroje, klastry). Před každou odstávkou bloku se zkontroluje a do zásobníků pro převážení čerstvých palivových souborů ze

### Kartogram - BSVP (TG21B01) před vyvezením AZ



### Kartogram - BSVP (TG21B01) po vyvezení AZ



Příklad kartogramů jednoho z bazénů skladování vyhořelého paliva - před vyvezením aktivní zóny a po vyvezení aktivní zóny 1. bloku v roce 2012



Převoz vyhořelého jaderného paliva do skladu vyhořelého paliva

skladu čerstvého paliva na blok nachystá 36 až 48 palivových souborů podle aktuálního návrhu budoucí aktivní zóny.

Veškeré manipulace s palivem probíhají během odstávky jaderného bloku, jedinou výjimkou jsou manipulace s čerstvým palivem uvnitř skladu čerstvého paliva před zahájením odstávky. Pro lepší přehlednost je rozdělujeme do několika etap, například: zavezení čerstvého paliva do bazénů skladování na reaktorovém sále, vyvezení aktivní zóny, zavezení aktivní zóny, přeskládání palivových souborů v bazénech skladování nebo v aktivní zóně, přeskládání klastrů a sekundárních zdrojů v palivových souborech, zavážení vyhořelých palivových souborů do obalových souborů typu Castor, vyvezení obalových souborů Castor do skladu vyhořelého paliva apod.

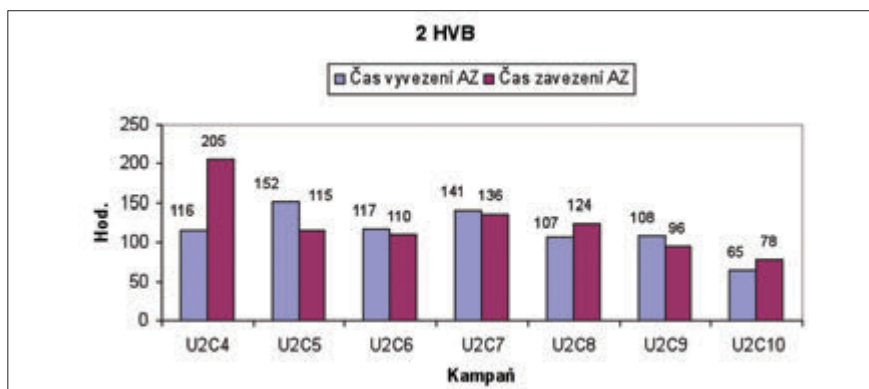
Pro každou etapu je zpracován předem přesný a podrobný harmonogram všech manipulací s palivem. Manipulace podle harmonogramu provádějí pracovníci útvaru Transportně-technologická část ETE z odboru POZ (Péče o zařízení) a kontrolují v souladu s vyhláškou SÚJB 146/1997 Sb. kontrolní fyzici z odboru Reaktorová fyzika. Pokud se manipulace provádějí na reaktorovém bloku, mají tyto harmonogramy k dispozici také vedoucí reaktorového bloku na blokové dozorně a směnový inženýr. Součástí každého harmonogramu jsou počáteční a koncové kartogramy. Jedná se o grafická zobrazení uložení jednotlivých palivových souborů v zásobnících čerstvého paliva, v bazénech skladování, v aktivní zóně reaktoru nebo v obalovém souboru typu Castor 1000/19. Všechny zobrazené buňky v kartogramech mají přesně stanovené koordináty, pomocí kterých se označuje aktuální pozice každého palivového souboru. Výchozí pozice před začátkem manipulace a konečná pozice po ukončení manipulace s palivovým souborem patří mezi základní informace v harmonogramech manipulací. S uvedenými koordinátami pracuje také software zavážecího stroje na reaktorovém sále.

### Kontroly před a během manipulací s jaderným palivem

Před zahájením manipulací s jaderným palivem na bloku musí být ověřena podkritičnost nového sortimentu paliva z hlediska jeho budoucího uložení v bazénech skladování. Dále musí být upravena koncentrace kyseliny borité v celém primárním okruhu, v bazénech skladování a dalších potenciálně připojitelných objemech (hydroakumulátory, jímka kontejmentu) na hodnotu vyšší hodnotě limitní, která jednak zajišťuje, aby při manipulacích s palivem byla udržena dostatečná podkritičnost paliva ve skladovacích mřížích bazénů skladování i při pádu palivového souboru do blízkosti zcela zaplněné kompaktní mříže a jednak aby i reaktor po celou dobu výměny paliva, během níž se reaktivita AZ průběžně mění, zůstal podkritický. Mimo mnoho dalších přípravných činností musí být také například připraven zavážecí stroj, polární jeřáb na reaktorovém sále, musí být zkontrolována čistota oblicovek bazénů, čistota hladin, podvodní kamerou pak před vyvážením palivových souborů z aktivní zóny jejich čistota povrchu, musí být zkontrolován chemický režim



Obalové soubory Castor® 1000/19 ve skladu vyhořelého paliva



Příklad postupného zkracování časů manipulací s palivem na 2. bloku

chladiva primárního okruhu a nastaven správně systém vzduchotechniky na reaktorovém sále.

Během všech manipulací s palivem v aktivní zóně musí nepřetřítit operativní personál a nezávisle i kontrolní fyzik sledovat a kontrolovat především velikost a průběh (změny) neutronového toku, koncentrace kyseliny borité v primárním okruhu, teploty a hladiny v bazénu výměny a provozuschopnost chlazení aktivní zóny. Během manipulací s palivem v bazénech skladování se podobně hlídá především koncentrace kyseliny borité, teplota a hladina, provozuschopnost chlazení bazénů a další parametry podle provozních předpisů elektrárny a Limit a podmínek bezpečného provozu.

### Přeprava paliva

Přeprava paliva v areálu elektrárny se uskutčňuje pomocí speciálně (pro dopravu jaderného paliva) určených dopravních prostředků. Čerstvé palivo se vozí pomocí transportního kolejového vozidla, na obalové soubory typu Castor je určen speciální vagón, pomocí kterého je obalový soubor převážen v horizontální poloze. Příští rok očekáváme zařazení do běžného provozu dalšího speciálního transportního prostředku pro převážení obalových souborů Castor, a to v poloze vertikální, což výrazně zjednoduší manipulace, čili zmenší se jejich počet, zlepší se bezpečnost a ušetří čas. Přepřevahu paliva uvnitř areálu zajišťují pracovníci Transportně-technologická část elektrárny) z odboru POZ (Péče o zařízení).

### Obalový soubor Castor® 1000/19

Každou odstávku je plánováno vyvézt z bloku do skladu vyhořelého paliva předepsaný počet obalových souborů Castor. Obalový soubor Castor® 1000/19 je určen pro přepravu a skladování

19 palivových souborů typu Vvantage 6 z jaderných reaktorů typu VVER 1000. Výběr a umístění palivových souborů v obalovém souboru není v žádném případě náhodný proces, palivové soubory musí splňovat bezpečnostní kritéria a podmínky dané typovým schválením SÚJB.

Vybraný pracovník reaktorové fyziky musí s předstihem a podle zadaných kritérií vytvořit vždy dostatečný počet kartogramů zavážek obalových souborů pro daný rok a blok tak, aby při odstávce mohl být odvezen jejich požadovaný počet. K tomu mu pomáhají jednak předpisy a návody obdržené od dodavatele obalových souborů (německá firma GNS), dále interní předpisy a metodiky a také výpočetní software. Například jedním z parametrů, který nesmí být u zavezení palivového souboru překročen, je jeho zbytkový tepelný výkon. Limitní hodnota pro jeden palivový soubor je 1,2 kW, přičemž summární zbytkový tepelný výkon všech 19 zavezených palivových souborů nesmí být větší než 17,5 kW.

### Funkce kontrolního fyzika

Funkce kontrolního fyzika při manipulacích s palivem zahrnuje kontrolu průběhu všech manipulací s jaderným palivem a dohled nad jadernou bezpečností při těchto manipulacích. Kontrolní fyzik za podpory útvaru Speciální kontrola jaderných elektráren mimo jiné provádí po ukončení manipulací s palivem kontrolu zavezení aktivní zóny a kontrolu zavezení obalových souborů Castor v souladu s navrženými kartogramy. Kontrola se provádí pomocí speciální podvodní kamery.

Všechny prováděné činnosti a kontroly jsou průběžně zaznamenávány v Deníku kontrolního fyzika, v tzv. calcnotech a protokolech ze zkoušek podle Požadavků na kontrolu v Limitech a podmínkách bezpečného provozu. Všechny připravené

dokumenty k manipulacím s palivem (harmonogramy manipulací, kartogramy závazek a instrukční soubory pro zavážecí stroj) jsou vždy podrobeny důsledné verifikaci jiným pracovníkem reaktorové fyziky, což zajišťuje odhalení případné chyby.

Po kontrole správnosti zavezení obalového souboru Castor® 1000/19 je na něj umístěno primární víko, poté je obalový soubor vyzvednut na reaktorový sál, kde je odvodněn, vysušen, naplněn heliem a zatěsněn sekundárním víkem. Po těchto a dalších úkonech je převezen do skladu vyhořelého paliva, kde je po nasazení krycí desky na servisním místě umístěn do skladovací lodi na příslušné monitorované místo.

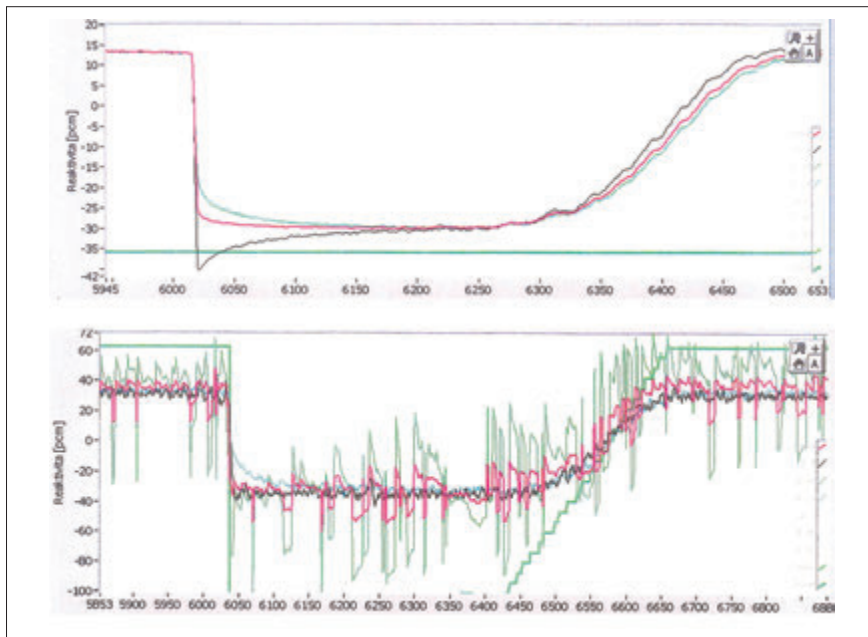
### Testy spouštění – funkce provozního fyzika

Pomyslným završením odstávky je pak z našeho hlediska provedení fyzikálních testů spouštění, jež ověří přímým měřením splnění vybraných bezpečnostních a provozních parametrů vsázky a jejich soulad s výpočtovými hodnotami – to je prací vedoucích jednotlivých testů a provozního fyzika. Vlastní testy spouštění jsou rozděleny do dvou částí. První jsou tzv. testy fyzikálního spouštění, které probíhají na minimálním výkonu bloku a ověřují zejména hlavní charakteristiky aktivní zóny, jako je např. účinnost regulačních orgánů nebo teplotní zpětná vazba. Druhou částí jsou pak tzv. testy energetického spouštění. Tyto testy probíhají na výkonových hladinách 30, 80 a 100 % nominálního výkonu. Jejich účelem je zejména ověřit rozložení výkonu v aktivní zóně a rovněž kalibrovat a ověřit správnou funkčnost vybraných systémů monitorujících vybrané parametry aktivní zóny a vybraných ochranných systémů.

Soubor jednotlivých testů byl na počátku provozu jaderné elektrárny rozsáhlý. Díky kombinaci ruské a americké technologie byla i sada fyzikálních testů určitým konglomerátem ruského a amerického přístupu. Docházelo tak i k určitému překrytí, či redundanci některých fyzikálních testů. Z tohoto důvodu tedy již určitou dobu probíhá snaha o optimalizaci provádění těchto testů a to zejména v etapě fyzikálního spouštění – tedy na tzv. nulovém výkonu.

### Přínosy k úsporám času při výměně paliva a při provádění testů spouštění

Vzhledem k dobrému stavu paliva po jeho dvou



Porovnání kvality signálů měření reaktivity (horní graf – po úpravě měřicí aparatury, dolní graf – před její úpravou)

letech provozu v aktivní zóně 1. bloku a po jednom roce na 2. bloku jsme mohli v obou odstávkách roku 2012 při manipulacích s palivem využít vyšší od dodavatele paliva povolené rychlosti zavážecího stroje. Tím jsme významně zkrátili původně plánované celkové časy pro manipulace s palivem oproti časům standardně dosahovaným v předchozí dekádě (2000 až 2010). V roce 2012 se jednalo řádově o desítky hodin.

Úpravou postupu provádění některých testů fyzikálního spouštění a zlepšením organizace práce (zejména při přípravě výchozích stavů pro jednotlivé testy) se v letošním roce povedlo na prvním bloku provést testy fyzikálního spouštění za necelých 45 hodin (plánovaná délka byla 50 hodin). Pro porovnání... ve druhé kampani prvního bloku byla plánovaná délka testů fyzikálního spouštění 76 hodin.

V roce 2012 se rovněž podařilo úspěšně odzkoušet modifikovaný postup dosahování kritického stavu po výměně paliva, kdy se zejména inovovaným postupem snižování koncentrace kyseliny borité podařilo dosáhnout celkové časové úspory 6 až 7 hodin.

V neposlední řadě se rovněž během spouštění v roce 2012 podařilo úspěšně otestovat a ve

standardním režimu provést test kalibrující axiální rozložení výkonu novou moderní metodou (tzv. SinglePoint). To vedlo ke zkrácení doby provozu na 80 % nominálního výkonu o přibližně 20 hodin. Zároveň oproti původní metodě měření nyní již není potřeba v aktivní zóně vyvolávat tzv. axiální oscilaci výkonu.

Velkým přínosem pro provádění testů byla rovněž výměna tzv. ionizačních komor pultu fyzikálního spouštění. Předchozí měřicí aparatura vykazovala značné nedostatky v kvalitě signálu, např. velmi vysoký šum a výpadky. Výměnou měřicí části za ionizační komory Rolls-Royce CC83 se pak všechny tyto neduhy eliminovaly a umožnily vedoucím testů spouštění jejich bezproblémové vyhodnocení, které bylo při použití předchozí měřicí aparatury jen velmi obtížné.

Tímto snaha o optimalizaci testů nekončí a cílem snažení je zkrátit v příštích dvou letech etapu provádění testů fyzikálního spouštění přibližně na polovinu současného doby trvání.

**Ing. Marta Soukupová, Ing. Lukáš Milisdörfer**  
Reaktorová fyzika,  
ČEZ, a.s., - Jaderná elektrárna Temelín

### Refuelling during the outage of the Temelín nuclear power plant

In their article, the authors describe the preparation and implementation of the spent nuclear fuel replacement during scheduled outages. They describe selected sections of the „lifetime“ of the fuel charge from its design and optimization through its loading into the reactor as a part of the refuelling operations, its testing during the start-up tests and disposal of spent fuel in a cask. They also describe the preparation and implementation, as well as economy of the fuel charge, the issues of fuel handling, fuel transport, supervision of all activities and benefits for time savings while refuelling.

### Замена топлива в рамках профилактической остановки АЭС Темелин

Авторы в статье описывают подготовку и проведение замены выгоревшего ядерного топлива в рамках запланированных остановок. Рассказывают о некоторых участках «жизни» топливной шихты от разработки и оптимизации до её загрузки в реактор в рамках замены топлива, тестирование во время проверки запуска и до помещения выгоревшего топлива в контейнер. В статье рассказывается о подготовке и реализации, об экономике топливной шихты, о проблематике манипуляции с топливом, о подготовке топлива и контроле всех действий, о сокращении времени на замену топлива.