

## Рецензия

на дипломната работа на г-жа Цветелина Йорданова, фак. No. 0PH0730001, студент в специалност „Ядрена техника и ядрена енергетика” на Физическия факултет на СУ „Св. Климент Охридски”

за придобиване на образователно-квалификационна степен „бакалавър”

от Венелин Русанов, Главен експерт в направление „Детерминистични анализи на безопасността“, в „Джи Си Ар“ АД.

Представената за рецензия дипломна работа е озаглавена „Еволюция на нуклидния състав на ядреното гориво“. Тя е структурирана в 30 страници и включва увод, основно изложение, в което се разглежда физичната природа на еволюцията на изотопния състав на ядреното гориво, както и математическият апарат на използвания аналитичен и числен метод за решаване на поставената задача. Работата съдържа резултати, заключение и приложение.

Списъкът на използваната литература включва 11 заглавия, като всички цитирани източници са коректно реферирани. Резултатите от изследването са илюстрирани с достатъчен брой графики. Оформлението на дипломната работа е правилно, включено е съдържание, като единствено липсват списъци на таблиците и фигурите.

Работата на дипломанта е посветена на изследването и анализа на различни подходи за пресмятане на изменението на изотопния състав на ядреното гориво, както в режим на експлоатационно изгаряне (depletion), така и в последващата фаза (post-irradiation) на неговото съхранение като отработено ядрено гориво (ОЯГ).

Преди да пристъпи към разглеждане на гореспоменатите подходи, дипломантът описва сравнително детайлно физичните механизми, водещи до изменение на нуклидния състав на ядреното гориво. В обзорен план са разгледани процесът на ядрено делене, профилът на разпределение на продуктите на делене по масово число, законът за радиоактивно разпадане, както и са изведени и дефинирани основни реакторно-физични величини като микро- и макроскопично сечение, скорост на реакция.

Прави впечатление доброто познаване на физичната природа на представените ядрено-физични процеси и закономерности, като например качествено обяснение на

релацията между квантовомеханичната вълнова природа на неутрона и енергетичната зависимост на микроскопичните ядрени сечения.

За придаване на по-голяма пълнота и яснота на изложението, би могло да се представи по-задълбочено качествено описание на физичния смисъл на някои величини - например вероятностната интерпретация на макроскопичното ядрено сечение в израза за отслабването на неутронния интензитет в материална среда, както и на скоростта на дадена неутронна реакция.

В частта, посветена на математическата постановка на задачата, дипломантът посочва основните изчислителни предизвикателства, свързани с пълномащабната формулировка на уравнението за неутронен пренос в неговото многомерно фазово пространство, без налагане на допълнителни опростяващи предположения. Следва описание на метода за генериране на еднотрупови библиотеки със сечения за поглъщане и делене, претеглени по спектъра на неутронния поток. Посочени са геометрия, хетерогенният материален състав и граничните условия като моделно изискуеми, както и свързаните с тях изчислителни особености.

За целите на настоящата дипломна работа е използвана една от стандартните еднотрупови библиотеки, налични в ресурсите на програмния комплекс за реакторно-физични анализи SCALE, което е разумен избор с оглед на обхвата и целите на изследването.

Прави положително впечатление логическата последователност в структурирането на математическата постановка на задачата. След описанието на процеса по генериране на еднотруповата библиотека, и преди изложението по същество на двата изследвани метода, е представена математическата формулировка на балансите уравнения за концентрацията на всеки индивидуален нуклид от изотопния състав на изследваното ядрено гориво. Системата от балансни уравнения, включително представена в матрично-векторна форма, представлява основа за построяването на изчислителните алгоритми, използвани в разглежданите подходи за решаване на задачата.

При представянето на аналитичния подход за изчисление на концентрацията на радионуклидният вектор чрез формулата на Бейтман са посочени физико-математическите условия, при които задачата е еднозначно определена и решима. Формулирани са предимствата, недостатъците и ограниченията на метода, което реализира смислов преход към разглеждането на матрично-експоненциалния

изчислителен подход - по-обща форма на задачата, преодоляваща трудностите, присъщи на метода на Бейтман.

Използването на балансите уравнения за ядрените концентрации на йод и ксенон придава илюстративност на изложението. Описанието на метода би било по-пълно и задълбочено, ако вместо крайните математически изрази за формулата на Бейтман беше представено тяхното постъпково извеждане - например чрез метода на правото и обратното преобразование на Лаплас с интегриране в комплексната равнина.

Посочени са различни конфигурации за началните условия на радионуклидния вектор, както и необходимите модификации във формулата на Бейтман за радиоактивни вериги, при които скоростта на изчезване на родителския нуклид не съвпада със скоростта на образуване на дъщерния. За пълноценно и точно приложение на метода, оценката на концентрацията на ксенон във времето е разделена на три отделни радиоактивни вериги, като е реализирано пресмятане при постоянен неутронен поток през първите 100 часа и нулев поток през следващите 100 часа.

Изчислителните резултати са представени графично, като относителните разлики спрямо референтното решение са около и под 1%. Обърнато е внимание на обстоятелството, че поради математическата структура на формулата на Бейтман може да възникне вадене на близки числа (константи на разпадане), което да доведе до катастрофална загуба на числена точност — важен аспект при практическото прилагане на метода.

Методът на матричната експонента е изложен изчерпателно и детайлно. Дефинирана е математическата структура на задачата — матрица с постоянни коефициенти и произволна структура, изобразяваща хомогенна система от линейни обикновени диференциални уравнения от първи ред. Формулирано е развитие в ред на Тейлор на балансите нуклидни уравнения в обобщен векторен запис, като постъпково е изведен крайният математически израз, на който е базиран изследваният изчислителен подход.

Представена е практическата процедура за реализиране на изчислителния алгоритъм, с ясно посочен критерий за сходимост на разглежданата задача. Извършен е анализ на изчислителната схема, като са определени факторите, посредством които може да се ускори сходимостта на решението. Това по естествен начин води до заключението

за възможността за пренебрегване на сравнително късоживеещите радионуклиди в генетичните вериги на радиоактивно разпадане.

В анализа на поставената задача се стига до извода, че един от факторите за ускоряване на сходимостта е намаляването на матричната норма на изследваната система, като е изведен конкретен математически израз. За придаване на пълнота на изчислителните възможности на метода на матричната експонента, в контекста на поставената математична задача, е посочен подход за оценка на концентрациите на късоживеещите радионуклиди чрез прилагане на техниката на интегриращия множител.

Вижда се, че дипломантът демонстрира задоволително познаване както на основни неутронно-физични величини и закономерности, така и на съответния математически апарат.

Представени са изчислителните резултати от прилагането на метода на матричната експонента за решаване на задачата за еволюция на нуклидния състав на ядреното гориво, посредством програмната реализация на модула ORIGEN-S (Bell, 1973), част от комплекса SCALE. Посочено е разяснително тълкуване на структурата на матрицата на преходите.

Процесите на изгаряне и възпроизводство на моделираното ядрено гориво са графично онагледени за времеви интервал от четири горивни кампании, като началните условия са зададени за количество от един метричен тон уран. Представени са пресмятания на радиоактивното разпадане на отработеното ядрено гориво в постексплоатационния му период, което показва, че изчислителната възможност за този етап също се съдържа в инструментариума на метода на матричната експонента.

В контекста на генерирането на радионуклиди с висока радиотоксичност в резултат на продължителна неутронна експозиция на горивото в активната зона на ядрения реактор и последващото му съхранение като отработено ядрено гориво (ОЯГ) или високоактивен радиоактивен отпадък, дипломантът е представил както пълната, така и частичната радиотоксичност на избрани изотопи. Оценката е извършена във волуметрични единици, отнесени към вода и въздух, за времеви интервал до 100 години след края на експлоатацията на ядреното гориво.

Заключението е компактно и обобщава точно предмета на изследване в настоящата дипломна работа.

Обръщам внимание на дипломанта, че съпоставянето на резултати, получени чрез прилагане на различни методи, базирани на независими изчислителни алгоритми/ програмни реализации, представлява подход, който отговаря на изискванията на добрите международни практики в областта на ядрените анализи.

Предлагам да се вземат предвид следните забележки:

- Да не се употребяват общи неясни формулировки, които не съдържат конкретика и не допринасят за яснота на изложението. Пример за такава формулировка е : „Изотопният състав на горивото е пряко свързан както с някои негови характеристики, които са по-силно изразени скоро след изваждането му от активната зона, така и с други негови качества, които са обект на интерес дълго време след края на живота му в експлоатацията...“;
- В становището „Фрагментите от делене и техните дъщерни продукти, получавани в следствие на радиоактивен разпад, са радиоактивният отпадък, който се генерира по време на експлоатация на ядреното гориво.“ се съдържа неточност - след експлоатационната си неутронна експозиция,  $UO_2$  се категоризира като отработено ядрено гориво (ОЯГ), което може да подлежи на последващо радиохимично преработване. В случай че такова вторично преработване не се предвижда, отработеното ядрено гориво се класифицира като високоактивен радиоактивен отпадък и подлежи на временно съхранение, респективно окончателно погребване посредством съответна технология;
- Изразът „външен размер на модела за касета“ не съдържа еднозначна геометрична конкретика;
- В документа, освен съдържание, да бъдат включени списъци на таблиците и фигурите.

Бих помолил г-жа Йорданова по време на публичната защита на дипломната си работа да отговори на следните въпроси:

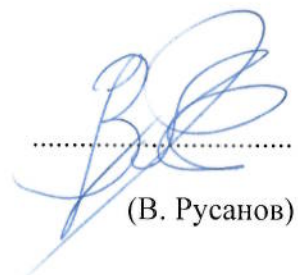
1. В точка 3.3 е представен подход за оценка на ядрената концентрация на един единствен късоживеещ радионуклид, разположен между сравнително дългоживеещи прекурсор и дъщерен изотоп. В тази връзка възниква въпросът дали съществува аналитичен или изчислителен подход за пресмятане на ядрената концентрация на редица от множество последователни късоживеещи радионуклиди, разположени в дадена генетична радиоактивна верига между

условно дългоживеещи прекурсор и дъщерен нуклид в двата края на схемата на радиоактивно разпадане?

2. Методът на матричната експонента в настоящата дипломна работа е разгледан за случая на хомогенна система от обикновени линейни балансни диференциални уравнения за концентрацията на съответния радионуклиден вектор. В тази връзка възниква въпросът: на базата на какво експлоатационно реакторно-физично обстоятелство естествено отпада необходимостта от изследване на по-общия нехомогенен вид на гореописаната система, например с включване на независим източник?

Прави впечатление, че дипломантът бораи със сравнително сложен математически апарат, както и че притежава добра представа за природата и взаимовръзките между основни величини в областта на неутронно-физичните пресмятания. Отчитайки сложността и комплексния характер на изпълнената работа, включваща разглеждане на физичните механизми на еволюцията на изотопния състав на ядреното гориво, както и изследването на два различни метода (аналитичен и изчислителен) за пресмятане на времевия профил на радионуклидния вектор – включително с анализ на сходимостта на алгоритъма на матричната експонента, давам висока оценка на дипломната работа на г-жа Цветелина Йорданова и препоръчвам на уважаемата изпитна комисия да я допусне до публична защита.

01.09.2025 г.



.....  
(В. Русанов)