

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Чернеженко Сергій Анатолійович

УДК 539.123; 621.039; 548.4

**НАДПОВІЛЬНЕ ХВИЛЬОВЕ НЕЙТРОННО-ЯДЕРНЕ ГОРІННЯ
НА НАДТЕПЛОВИХ НЕЙТРОНАХ І РЕЖИМИ ІЗ ЗАГОСТРЕННЯМ
В УРАН-ПЛУТОНІЄВОМУ СЕРЕДОВИЩІ**

01.04.16 - фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Одеса - 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Одеському національному політехнічному університеті
Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, професор
Тарасов Віктор Олександрович,
Одеський національний політехнічний університет,
професор кафедри теоретичної і експериментальної
ядерної фізики

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор,
Каденко Ігор Миколайович,
Київський національний університет
ім. Тараса Шевченка,
завідувач кафедри ядерної фізики

доктор фізико-математичних наук, професор,
Павлович Володимир Миколайович,
Інститут ядерних досліджень НАН України,
завідувач відділом теорії ядерних реакторів

Захист відбудеться “ 31 ” липня 2015 р. в 14⁰⁰ годин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.052.06 в Одеському національному політехнічному університеті за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченко,1.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Одеського національного політехнічного університету за адресою: 65044, м. Одеса, пр. Шевченко, 1 та сайті <http://opu.ua/science/dissertation>

Автореферат розісланий “ ” червня 2015 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради
д.т.н., професор



Т.М. Зеленцова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Однією з самих актуальних проблем ядерної енергетики є безпечна робота ядерного реактора. Цю проблему можна вирішувати двома шляхами: розробка ефективних методів контролю активної зони реактора і розробка нового класу безпечних реакторів.

Вимогам по безпеці для реакторів нового V покоління повною мірою відповідає реактор типу Л.П. Феоктистова, що характеризується так званою внутрішньою безпекою. У такому перспективному реакторі реалізується режим нейтронно-ділильної хвилі повільного ядерного горіння в уран-плутонієвому середовищі.

Крім безпеки, найважливішою перевагою цього нового типу реакторів є можливість використовувати як паливо природний (і навіть технічний) уран, а, отже, і відпрацьоване ядерне паливо. Це дозволяє виключити в паливно-ядерному циклі процедуру збагачення ядерного палива й тим самим вирішити проблему паливної бази ядерної енергетики на довгі роки, а також дозволить вирішити проблему накопичення відпрацьованого ядерного палива в біосфері Землі. Більш того, у цих реакторах відсутня система регулювання реактивності реактора, а ступінь вигорання палива може досягати 30-50% і вище залежно від постановки задачі. При цьому він може бути реалізований як реактор з гомогенною, так і з гетерогенною активною зоною, а також як реактор з великою часовою компанією.

При розрахунках такого реактора кінетичні рівняння реактора включають рівняння дифузійного типу зі зворотними зв'язками різного виду. Базові кінетики реактора (кінетики нейтронів і нуклідів) зв'язані прямими й зворотними зв'язками з кінетиками теплопереносу й радіаційних дефектів палива. Кінетика дефектів палива, через зміну геометричних розмірів, викликаних пластичною деформацією, розпуханням або руйнуванням палива, що перебуває під навантаженням та опроміненням, а також через зміну його щільності впливає на реактивність реактора. Тому дослідження стійкості роботи реакторів вимагають застосування методів нелінійної динаміки. У той же час, кінетика реактора типу Феоктистова характеризується рядом принципів для теорії нелінійних дисипативних структур особливостей, однією з яких є нерівноважність уран-плутонієвого середовища, в умовах високих щільностей нейтронного поля і високих температур. Утворення дисипативних теплових структур (режими із загостренням С. П. Курдюмова), дисипативних структур дефектів уран-плутонієвого середовища, може істотно впливати на кінетику реактора, зокрема, на саму реалізацію хвилі повільного ядерного горіння в реакторі типу Феоктистова й на її стійкість.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконувалася відповідно до НДР «Уран-плутонієвий ядерний реактор, його дистанційна антинейтронна спектрометрія і режими із загостренням в уран-плутонієвому середовищі» (номер держреєстрації 0112U000568) і «Моделювання важкої аварії з різким зростанням реактивності реактора ВВЕР-1000/320 при невеликих течах першого контуру» (номер держреєстрації 0112U000569), які виконувались на протязі 2011-2015 рр., а також програми досліджень за договором про науково-технічне співробітництво між ОНПУ та Інститутом ядерних досліджень та ядерної енергетики Болгарської Академії наук (м. Софія).

При виконанні цих науково-дослідних робіт роль автора дисертації полягала в розробці кінетики реактора Феоктистова, математичному моделюванні бігучої хвилі нейтронно-ядерного горіння в нестационарних нейтронних мультіплікуючих середовищах, розробці теорії і дослідженнях режимів із загостренням в уран-плутонієвому середовищі.

Мета роботи й задачі дослідження. Метою роботи є визначення можливості існування хвильового нейтронно-ядерного горіння для областей енергій нейтронів значно менших швидкої області і режимів із загостренням в уран-плутонієвому середовищі.

Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати наступні задачі:

- розробити узагальнений критерій Феоктистова для виникнення режиму хвильового нейтронно-ядерного горіння;

- провести дослідження виконання узагальненого критерію Феоктистова для існування режиму хвильового нейтронно-ядерного горіння в широкому діапазоні енергій нейтронів (0,010 еВ – 1 МеВ) в уран-плутонієвому середовищі;

- провести математичне моделювання кінетики режиму хвильового нейтронно-ядерного горіння в уран-плутонієвому середовищі в діапазоні енергій нейтронів, що відповідає виконанню узагальненого критерію хвильового горіння;

- розробити теорію режимів із загостренням в уран-плутонієвому середовищі;

- провести математичне моделювання виникнення режимів із загостренням в уран-плутонієвому середовищі для чого необхідно:

- а) отримати залежності перерізів основних нейтронно-ядерних реакцій для основних реакторних нуклідів від температури уран-плутонієвого паливного середовища (Доплер ефект) у широкому температурному діапазоні (до 6000 К);

- б) отримати залежності усереднених за нейтронними спектрами перерізів основних нейтронно-ядерних реакцій для основних реакторних нуклідів від температури уран-плутонієвого паливного середовища в широкому температурному діапазоні (до 6000 К);

- в) отримати залежності щільності теплового джерела від температури уран-плутонієвого середовища;

- г) провести математичне моделювання режимів із загостренням в уран-плутонієвому середовищі.

Об'єкт дослідження – процеси у хвильових ядерних реакторах.

Предмет дослідження – кінетика хвильового нейтронно-ядерного горіння і режими із загостренням в уран-плутонієвих середовищі.

Методи дослідження - методи реакторної фізики і нелінійної динаміки при дослідженні кінетики реакторів V покоління; теорія нелінійних дисипативних структур при розробці теорії дисипативних теплових структур; методи радіаційної фізики металів для розробки теорії дисипативних структур дефектів; чисельні методи розв'язання систем диференціальних рівнянь; обчислювальні методи для комп'ютерного моделювання кінетики реактора.

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

1. Вперше сформульовано загальний критерій для існування хвильових режимів нейтронно-ядерного горіння як для хвилі Ахієзера, так й для хвилі Феоктистова.

2. Вперше показано, що для середовища з урану ^{238}U можливо існування хвильового ядерного горіння не тільки на швидких, але й на холодних, надтеплових і резонансних нейтронах.

3. На підставі результатів дослідження виконання критерію Феоктистова для середовища з урану- ^{238}U зі збагаченням по урану- ^{235}U , що відповідає підкритичному стану, вперше показано можливість існування режиму повільного хвильового нейтронно-ядерного горіння уран-плутонієвих середовищ в області холодних, теплових, надтеплових і резонансних нейтронів.

4. Вперше за допомогою чисельного моделювання показано можливість хвильового нейтронно-ядерного повільного горіння природного урану в надтепловій області енергій нейтронів (1,0-7,0 eВ).

5. Вперше показано можливість створення хвильового ядерного реактора на теплових нейтронах з ядерним паливом із природного урану та урану- ^{238}U з різним ступенем збагачення по урану- ^{235}U .

6. Вперше виявлено і теоретично обґрунтовано резонансний характер залежності усереднених за нейтронними спектрами перерізів основних ядерних реакцій (поділу і радіаційного захвату) в реакторі від температури ядерного палива.

7. Отримано температурні залежності щільності теплового джерела для уран-плутонієвого середовища, які можуть будувати апроксимовані ступеневою функцією із показником ступеня більшим за 1, і вперше доведено існування режимів із загостренням Курдюмова.

8. Вперше отримано нестационарні дисипативні теплові $3d$ структури в уран-плутонієвому середовищі.

9. Вперше показана можливість існування режимів із загостренням та їх види для всіх відомих видів реакторного ядерного палива з урахуванням їх теплофізичних властивостей.

10. Вперше виявлено і пояснено принципову відмінність температурних залежностей щільностей теплових джерел для МОКС-палива та оксидного уранового палива, що дозволило виявити й обґрунтувати характерні риси аварії на 3-му блоці АЕС «Фукусіма-1».

Практична значимість отриманих результатів.

Отримані в широких температурних інтервалах функціональні залежності усереднених за нейтронними спектрами перерізів основних реакторних нейтронних ядерних реакцій (поділу і радіаційного захвату) від температури реакторного ядерного палива можуть бути використані при розв'язанні широкого кола актуальних задач:

- дослідження фізики ядерних реакторів, тому що знання цих залежностей необхідно при дослідженнях кінетики ядерних реакторів, що прямо пов'язане з безпекою роботи реакторів і дозволяє розробляти ядерні реактори нового покоління із внутрішньою безпекою (наприклад, перспективних швидких уран-плутонієвих реакторів V покоління, реактор типу Л.П. Феоктистова);

- визначення характеристик міцності (таких як радіаційна повзучість, розпухання і тріщиностійкість) реакторного ядерного палива;
- кінетика природного геореактора.

Отримані в дисертації теоретичні результати розкривають теорію реакторів на бігучій хвилі, нейтронно-ядерних реакцій та її істотні особливості в порівнянні з кінетикою ядерних реакторів попередніх поколінь. Ця теоретична база є необхідною базою для прийняття на практиці оптимальних інженерних і проектних технічних рішень по розробці конструкцій ядерних реакторів, що працюють у режимі бігучої хвилі, нейтронно-ядерних реакцій, і прогнозування параметрів розроблюваних ядерних реакторів нового покоління.

Особистий внесок здобувача. Всі результати, які складають основний зміст дисертації, отримані особисто автором, а саме:

- визначено загальний критерій існування хвильових режимів нейтронно-ядерного горіння як для хвилі Ахієзера, так і для хвилі Феоктистова;
- для середовища з урану-238, проведені дослідження виконання критерію хвильового горіння в широкому діапазоні енергій нейтронів і вперше виявлена можливість хвильового ядерного горіння не тільки в області швидких нейтронів, але й для холодних, надтеплових і резонансних нейтронів.
- досліджено виконання критерію Феоктистова для середовищ, що спочатку складаються з урану 238 зі збагаченнями 4,38 %, 2,00 %, 1,00 %, 0,71 % і 0,50% по урану 235, в області енергій нейтронів 0,015 - 10,00 еВ;
- показано існування хвильового нейтронно-ядерного повільного горіння природного урану в надтепловій області енергій нейтронів (1,0-7,0 еВ).
- показано можливість створення теплового хвильового ядерного реактора, який може працювати на природному урані та урані-238 з різним ступенем збагачення по урану-235, а також хвильових ядерних реакторів на швидких, холодних, теплових, надтеплових і резонансних нейтронах;
- розроблено комп'ютерну програму і проведено розрахунки залежності перерізів нейтронних ядерних реакцій від енергій нейтронів з урахуванням ефекту Доплера, тобто, для різних температур ядерного палива;
- розроблена комп'ютерна програма й проведені комп'ютерні обчислення для основних реакторних паливних нуклідів $^{235}_{92}U$, $^{238}_{92}U$ і $^{239}_{94}Pu$, усереднених за нейтронними спектрами перерізів основних реакторних ядерних реакцій (поділу й радіаційного захвату) від температури реакторного ядерного палива;
- отримано функціональні залежності усереднених за нейтронними спектрами перерізів основних реакторних ядерних реакцій (поділу й радіаційного захвату) від температури реакторного ядерного палива;
- отримано температурні залежності щільності теплового джерела і нестационарні дисипативні теплові 3d структури для уран-плутонієвого середовища
- досліджено можливість існування режимів із загостренням у паливних матеріалах ядерних реакторів і визначено можливі режими із загостренням для кожного з відомих видів ядерного пального з урахуванням їх теплофізичних властивостей.

Апробація результатів дисертації. Основні положення й результати дисертації доповідалися й обговорювалися на V-IX конференціях по фізиці високих

енергій, ядерній фізиці й прискорювачам (Харків, Україна, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011); 2-4 Intern. Conf. “Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy” (NPAE) (Kyiv, Ukraine, 2008, 2010, 2012); Міжнародних наукових конференціях студентів і молодих наукових співробітників по теоретичній та експериментальній фізиці «Еврика» (Львів, Україна, 2010, 2013, 2014); XII Міжнародної конференції «Харитоновские тематические чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии» (Саров, Росія, 2010); XIX і XX Міжнародних конференціях по фізиці радіаційних явищ і радіаційному матеріалознавству (Алушта, Україна, 2010, 2012); The 4th Chaotic Modeling and Simulation International Conference (CHAOS 2011) (Agios Nikolaos, Crete, Greece, 2011); 3-4 міжнародних науково-технічних конференціях "Підвищення безпеки й ефективності атомної енергетики" (Одеса, Україна, 2012, 2014); The 23rd International Conference on Nuclear Engineering (Makuhari Messe, Chiba, Japan, 2015).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи викладено в 38 наукових публікаціях, у тому числі в 12 статтях у наукових фахових журналах, 6 статтях у матеріалах наукових конференцій і додатково висвітлені у 20 тезах доповідей наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, трьох розділів, висновків, списку літератури і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 218 сторінок, включаючи 125 рисунків і 20 таблиць. Список літературних джерел містить 288 найменування цитованої літератури.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дається загальна характеристика роботи, обґрунтовується її актуальність, наукове й практичне значення отриманих результатів, формулюється мета й задачі дослідження, приводяться основні результати й положення, які виносяться на захист.

У першому розділі представлений огляд робіт, присвячених кінетиці хвильового нейтронно-ядерного горіння; теорії рівнянь теплопереносу дифузійного типу з нелінійними тепловим джерелом і теплопровідністю, для яких характерні розв'язки у вигляді нестационарних теплових структур, тобто, режими із загостренням С. П. Курдюмова. Також розглянуто теорії температурної залежності перерізів основних нейтронних ядерних реакцій для основних реакторних паливних нуклідів; теоретичні та експериментальні роботи з теплоємності і теплопровідності середовищ, що діляться, з урахуванням змін фазових станів та геореактора на бігучій хвилі. На основі проведеного аналізу сформульовано мету і задачі дослідження.

У другому розділі на підставі дослідження виконання критерію існування хвильового нейтронно-ядерного горіння, запропонованого Л. П. Феоктистовим, і розробленого узагальненого критерію, який враховує залежність від енергетичного спектра нейтронів, у широкому діапазоні енергій нейтронів (0,010 еВ – 1 МеВ), і нуклідного складу, виявлена можливість хвильового ядерного горіння не тільки в області швидких нейтронів, але й для холодних, надтеплових і резонансних нейтронів. Сформульовано загальний критерій існування хвильових режимів нейтронно-ядерного горіння, як для повільної хвилі горіння Ахієзера, так і для надповільної хвилі горіння Феоктистова. Представлено результати дослідження виконання

критерію нейтронно-ядерного горіння для середовища із природного урану- 238, а також зі збагаченням 4,38 %, 2,00 %, 1,00 %, 0,71 % і 0,50% по урану 235 в області енергій нейтронів 0,015 - 10,00 еВ. Ці результати свідчать про можливість існування режиму надповільного хвильового нейтронно-ядерного горіння уран-плутонієвих середовищ для урану-238 зі збагаченням по урану-235, що відповідає підкритичному стану, в області холодних, теплових, надтеплових і резонансних нейтронів (рис.1).

Для підтвердження справедливості висновків, заснованих на аналізі відповідності критерію хвильового нейтронно-ядерного горіння залежно від енергії нейтронів, було проведене чисельне моделювання повільного нейтронно-ядерного горіння природного урану в надтепловій області енергій нейтронів (0,1-7,0 еВ). Розглядався півпростір по координаті x , заповнений природним ураном (99,28% уран-238 і 0,72% уран-235), що опромінюється з відкритої поверхні нейтронним джерелом. Для простоти розглядається дифузійне одноступеневе наближення (енергія нейтронів ~ 1 еВ). Уран-238, якщо він поглинає нейтрон, перетворюється в уран-239 і потім внаслідок двох β -розпадів з характерним часом β -розпаду $\tau_{\beta} \sim 3,3$ дні переходить у ізотоп плутоній-239, що ділиться. Як було показано в розд. 1, у такому середовищі може виникнути повільна нейтронно-ділительна хвиля горіння плутонію-239.

З урахуванням запізнених нейтронів кінетика такої хвилі описується системою з 20 диференціальних рівнянь у частинних похідних зі зворотними нелінійними зв'язками відносно 20 функцій $n(x,t)$, $N_5(x,t)$, $N_8(x,t)$, $N_9(x,t)$, $N_{Pu}(x,t)$, $\tilde{N}_i^{(Pu)}(x,t)$, $\tilde{N}_i^{(5)}(x,t)$, $\bar{N}^{(Pu)}(x,t)$, $\bar{N}^{(5)}(x,t)$ двох змінних x і t , яка може бути записана у такий спосіб.

Спочатку випишемо кінетичне рівняння для щільності нейтронів:

$$\frac{\partial n(x,t)}{\partial t} = D \Delta n(x,t) + q(x,t), \quad (1)$$

де об'ємна щільність джерела $q(x,t)$:

$$\begin{aligned} q(x,t) = & \left[\nu^{(Pu)}(1 - p^{(Pu)}) - 1 \right] \cdot n(x,t) \cdot V_n \cdot \sigma_f^{Pu} \cdot N_{Pu}(x,t) + \\ & + \left[\nu^{(5)}(1 - p^{(5)}) - 1 \right] \cdot n(x,t) \cdot V_n \cdot \sigma_f^5 \cdot N_5(x,t) + \ln 2 \cdot \sum_{i=1}^6 \left[\frac{\tilde{N}_i^{(Pu)}}{T_{1/2}^{i(Pu)}} + \frac{\tilde{N}_i^{(5)}}{T_{1/2}^{i(5)}} \right] - \\ & - n(x,t) \cdot V_n \cdot \left[\sum_{5,8,9,Pu} \sigma_c^i \cdot N_i(x,t) + \sum_{i=1}^6 \left[\sigma_c^{i(Pu)} \cdot \tilde{N}_i^{(Pu)}(x,t) + \sigma_c^{i(5)} \cdot \tilde{N}_i^{(5)}(x,t) \right] \right] - \\ & - n(x,t) \cdot V_n \cdot \left[\sigma_c^{eff(Pu)} \cdot \bar{N}^{(Pu)}(x,t) + \sigma_c^{eff(5)} \cdot \bar{N}^{(5)}(x,t) + \sigma_c^{eff} \cdot \bar{N}(x,t) \right], \end{aligned} \quad (2)$$

де $n(x,t)$ – щільність нейтронів; D - коефіцієнт дифузії нейтронів; V_n – швидкість нейтронів ($E=3$ еВ, одноступеневе наближення); $\nu^{(Pu)}$ і $\nu^{(5)}$ - дорівнює середньому числу миттєвих нейтронів на один акт поділу ^{239}Pu і ^{235}U відповідно; N_5 , N_8 , N_9 , N_{Pu} - концентрації ^{235}U , ^{238}U , ^{239}U , ^{239}Pu відповідно; $\tilde{N}_i^{(Pu)}$ і $\tilde{N}_i^{(5)}$ - концентрації нейтрон-

но-надлишкових осколків поділу ядер ^{239}Pu і ^{235}U відповідно; $\bar{N}_i^{(Pu)}$ і $\bar{N}_i^{(S)}$ - концентрації всіх інших осколків поділу ядер ^{239}Pu і ^{235}U відповідно; $\bar{N}(x,t)$ - концентрації ядер, що нагромадилися, «шлаків» σ_c ; $\sigma_f i$ - мікроперерізу реакції радіаційного захвату нейтрона й діленню ядра; p_i ($p = \sum_{i=1}^6 p_i$) і $T_{1/2}^i$ - відомі параметри, що характеризують групи запізнених нейтронів для основних паливних нуклідів, що діляться. Відзначимо, що при виводі рівняння для $q(x,t)$ для урахування запізнених нейтронів використовувався метод Ахієзера-Померанчука.

Останні члени у квадратних дужках у правій частині (2) задавалися відповідно до методу усередненого ефективного перерізу для «шлаків», наприклад, для осколків поділу ядер:

$$n(x,t)V_n \sum_{i=\text{fission fragments}} \sigma_c^i \bar{N}_i(x,t) = n(x,t)V_n \sigma_c^{\text{eff}} \bar{N}(x,t), \quad (3)$$

де σ_c^{eff} - деякий ефективний мікропереріз радіаційного захоплення нейтронів для осколків.

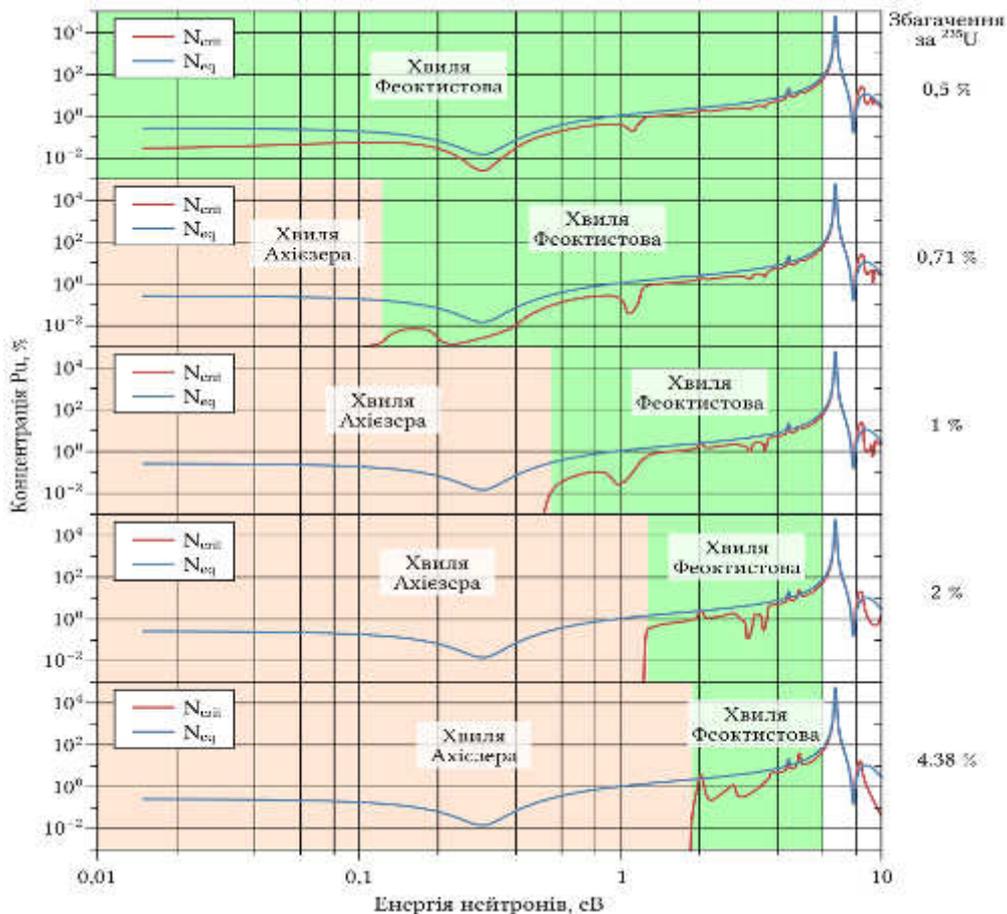


Рис. 1. Залежності рівноважної і критичної концентрацій ^{239}Pu від енергії нейтронів в інтервалі енергій 0,015 - 10 еВ, що з урану 238 зі збагаченнями 4,38 %, 2,00%, 1,00%, 0,71% (природний уран) і 0,50 % по урану 235.

Кінетичні рівняння для $\bar{N}^{(Pu)}(x, t)$ і $\bar{N}^{(5)}(x, t)$ мали наступну форму:

$$\frac{\partial \bar{N}^{(Pu)}(x, t)}{\partial t} = 2 \left(1 - \sum_{i=1}^6 p_i^{(Pu)} \right) \cdot n(x, t) \cdot V_n \cdot \sigma_f^{Pu} \cdot N_{Pu}(x, t) - V_n \cdot n(x, t) \cdot \sigma_c^{eff(Pu)} \cdot \bar{N}^{(Pu)}(x, t) \quad (4)$$

i

$$\frac{\partial \bar{N}^{(5)}(x, t)}{\partial t} = 2 \left(1 - \sum_{i=1}^6 p_i^{(5)} \right) \cdot n(x, t) \cdot V_n \cdot \sigma_f^5 \cdot N_5(x, t) - V_n \cdot n(x, t) \cdot \sigma_c^{eff(5)} \cdot \bar{N}^{(5)}(x, t). \quad (5)$$

Отже, отримуємо наступну систему з 20 кінетичних рівнянь:

$$\frac{\partial n(x, t)}{\partial t} = D \Delta n(x, t) + q(x, t), \quad (6)$$

де $q(x, t)$ задається виразом (2);

$$\frac{\partial N_8(x, t)}{\partial t} = -V_n n(x, t) \sigma_c^8 N_8(x, t); \quad (7)$$

$$\frac{\partial N_9(x, t)}{\partial t} = V_n n(x, t) \left[\sigma_c^8 N_8(x, t) - \sigma_c^9 N_9(x, t) \right] - \frac{1}{\tau_\beta} N_9(x, t); \quad (8)$$

$$\frac{\partial N_{Pu}(x, t)}{\partial t} = \frac{1}{\tau_\beta} N_9(x, t) - V_n n(x, t) \left(\sigma_f^{Pu} + \sigma_c^{Pu} \right) N_{Pu}(x, t); \quad (9)$$

$$\frac{\partial N_5(x, t)}{\partial t} = -V_n n(x, t) \left(\sigma_f^5 + \sigma_c^5 \right) N_5(x, t); \quad (10)$$

$$\frac{\partial \tilde{N}_i^{(Pu)}(x, t)}{\partial t} = p_i^{(Pu)} \cdot V_n \cdot n(x, t) \cdot \sigma_f^{Pu} \cdot N_{Pu}(x, t) - \frac{\ln 2 \cdot \tilde{N}_i^{(Pu)}(x, t)}{T_{1/2}^{i(Pu)}} - \quad (11)$$

$$-V_n \cdot n(x, t) \cdot \sigma_c^{eff(Pu)} \cdot \tilde{N}_i^{(Pu)}(x, t), \quad i = 1, 6;$$

$$\frac{\partial \tilde{N}_i^{(5)}(x, t)}{\partial t} = p_i^{(5)} \cdot V_n \cdot n(x, t) \cdot \sigma_f^5 \cdot N_5(x, t) - \frac{\ln 2 \cdot \tilde{N}_i^{(5)}(x, t)}{T_{1/2}^{i(5)}} - \quad (12)$$

$$-V_n \cdot n(x, t) \cdot \sigma_c^{eff(5)} \cdot \tilde{N}_i^{(5)}(x, t), \quad i = 1, 6;$$

$$\frac{\partial \bar{N}^{(Pu)}(x, t)}{\partial t} = 2 \left(1 - \sum_{i=1}^6 p_i^{(Pu)} \right) \cdot n(x, t) \cdot V_n \cdot \sigma_f^{Pu} \cdot N_{Pu}(x, t) - V_n \cdot n(x, t) \cdot \sigma_c^{eff(Pu)} \cdot \bar{N}^{(Pu)}(x, t); \quad (13)$$

$$\frac{\partial \bar{N}^{(5)}(x, t)}{\partial t} = 2 \left(1 - \sum_{i=1}^6 p_i^{(5)} \right) \cdot n(x, t) \cdot V_n \cdot \sigma_f^5 \cdot N_5(x, t) - V_n \cdot n(x, t) \cdot \sigma_c^{eff(5)} \cdot \bar{N}^{(5)}(x, t); \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \bar{\bar{N}}(x, t) = & V_n n(x, t) \left[\sigma_c^9 N_9(x, t) + \sigma_c^{Pu} N_{Pu}(x, t) + \sigma_c^5 N_5(x, t) + \sum_{i=1}^6 \left(\sigma_c^{eff(Pu)} \tilde{N}_i^{(Pu)}(x, t) + \sigma_c^{eff(5)} \tilde{N}_i^{(5)}(x, t) \right) + \right. \\ & \left. + \sigma_c^{eff(Pu)} \bar{N}^{(Pu)}(x, t) + \sigma_c^{eff(5)} \bar{N}^{(5)}(x, t) \right] + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{\tilde{N}_i^{(Pu)} \ln 2}{T_{1/2}^{i(Pu)}} + \frac{\tilde{N}_i^{(5)} \ln 2}{T_{1/2}^{i(5)}} \right), \quad (15) \end{aligned}$$

де $\bar{\bar{N}}(x, t)$ - сумарна кількість «шлакуючих» ядер, а τ_β - час життя ядра відносно до β - розпаду.

Граничні умови:

$$n(x,t)\Big|_{x=0} = \frac{\Phi_0}{V_n} \quad \text{і} \quad n(x,t)\Big|_{x=l} = 0, \quad (16)$$

де Φ_0 - щільність нейтронів, створюваних плоским дифузійним джерелом нейтронів, розташованим на границі при $x=0$; l - довжина блоку із природного урану, що задається при моделюванні.

Початкові умови:

$$n(x,t)\Big|_{x=0,t=0} = \frac{\Phi_0}{V_n} \quad \text{і} \quad n(x,t)\Big|_{x \neq 0,t=0} = 0; \quad (17)$$

$$N_8(x,t)\Big|_{t=0} = 0,9928 \cdot \frac{\rho_8}{\mu_8} N_A \approx 0,9928 \cdot \frac{19}{238} N_A \quad \text{і} \quad N_5(x,t)\Big|_{t=0} \approx 0,7200 \cdot \frac{19}{238} N_A, \quad (18)$$

де ρ_8 - щільність ($\text{г}/\text{см}^3$) урану 238, μ_8 - моль ($\text{г} \cdot \text{моль}^{-1}$) урану 238, N_A - число Авогадро;

$$\begin{aligned} N_9(x,t)\Big|_{t=0} = 0, \quad N_{Pu}(x,t)\Big|_{t=0} = 0, \quad \tilde{N}_i^{(Pu)}(x,t)\Big|_{t=0} = 0, \quad \tilde{N}_i^{(5)}(x,t)\Big|_{t=0} = 0, \\ \bar{N}_i^{(Pu)}(x,t)\Big|_{t=0} = 0, \quad \bar{N}_i^{(5)}(x,t)\Big|_{t=0} = 0. \end{aligned} \quad (19)$$

Чисельне розв'язання системи рівнянь (6) - (15) із граничними й початковими умовами (16) - (19) проводилося за допомогою програмного пакета Mathematica 8.

Для оптимізації процесу чисельного розв'язання системи рівнянь був здійснений перехід до безрозмірних величин, відповідно до наступних співвідношень:

$$n(x,t) = \frac{\Phi_0}{V_n} n^*(x,t), \quad N(x,t) = \frac{\rho_8 N_A}{\mu_8} N^*(x,t). \quad (20)$$

Проведено моделюючі розрахунки для декількох варіантів завдання чисельних значень постійних коефіцієнтів диференціальних рівнянь. У дисертації представлені результати двох моделюючих розрахунків.

При першому розрахунку задавалися наступні чисельні значення постійних коефіцієнтів диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned} D = 2,0 \cdot 10^4 \text{ см}^2 / \text{с}; \quad V_n = 1,0 \cdot 10^6 \text{ см} / \text{с}; \quad \Phi_0 = 1,0 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-2} \text{с}^{-1}; \quad \tau_\beta \sim 3,3 \text{ дні}; \quad \nu^{(Pu)} = 2,90; \\ \nu^{(5)} = 2,41; \quad \sigma_f^{Pu} = 477,04 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2; \quad \sigma_c^{Pu} = 286,15 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2; \quad \sigma_c^8 = 252,50 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2; \\ \sigma_f^5 = 136,43 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2; \quad \sigma_c^5 = 57,61 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2; \quad \sigma_c^9 = 4,80 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2; \quad \sigma_c^{eff(Pu)} = 1,10 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2; \\ \sigma_c^{i(Pu)} = 1,00 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2, \quad i=1-6; \quad \sigma_c^{i(5)} = 1,00 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2, \quad i=1-6; \quad \sigma_c^{eff(5)} = 1,10 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2; \\ T_1^{(Pu)} = 54,28 \text{ с}; \quad T_2^{(Pu)} = 23,04 \text{ с}; \quad T_3^{(Pu)} = 5,60 \text{ с}; \quad T_4^{(Pu)} = 2,13 \text{ с}; \quad T_5^{(Pu)} = 0,62 \text{ с}; \quad T_6^{(Pu)} = 0,26 \text{ с}; \\ p_1^{(Pu)} = 0,072 \cdot 10^{-3}; \quad p_2^{(Pu)} = 0,626 \cdot 10^{-3}; \quad p_3^{(Pu)} = 0,444 \cdot 10^{-3}; \quad p_4^{(Pu)} = 0,685 \cdot 10^{-3}; \\ p_5^{(Pu)} = 0,180 \cdot 10^{-3}; \quad p_6^{(Pu)} = 0,093 \cdot 10^{-3}; \quad p^{(Pu)} = \sum_{i=1}^6 p_i^{(Pu)} = 0,0021; \quad \sigma_c^{eff} = 1,10 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2; \\ T_1^{(5)} = 55,72 \text{ с}; \quad T_2^{(5)} = 22,72 \text{ с}; \quad T_3^{(5)} = 6,22 \text{ с}; \quad T_4^{(5)} = 2,30 \text{ с}; \quad T_5^{(5)} = 0,61 \text{ с}; \quad T_6^{(5)} = 0,23 \text{ с}; \\ p_1^{(5)} = 0,210 \cdot 10^{-3}; \quad p_2^{(5)} = 1,400 \cdot 10^{-3}; \quad p_3^{(5)} = 1,260 \cdot 10^{-3}; \quad p_4^{(5)} = 2,520 \cdot 10^{-3}; \quad p_5^{(5)} = 0,740 \cdot 10^{-3}; \\ p_6^{(5)} = 0,27 \cdot 10^{-3}; \quad p^{(5)} = \sum_{i=1}^6 p_i^{(5)} = 0,0064; \quad l = 100 \text{ см}. \end{aligned} \quad (21)$$

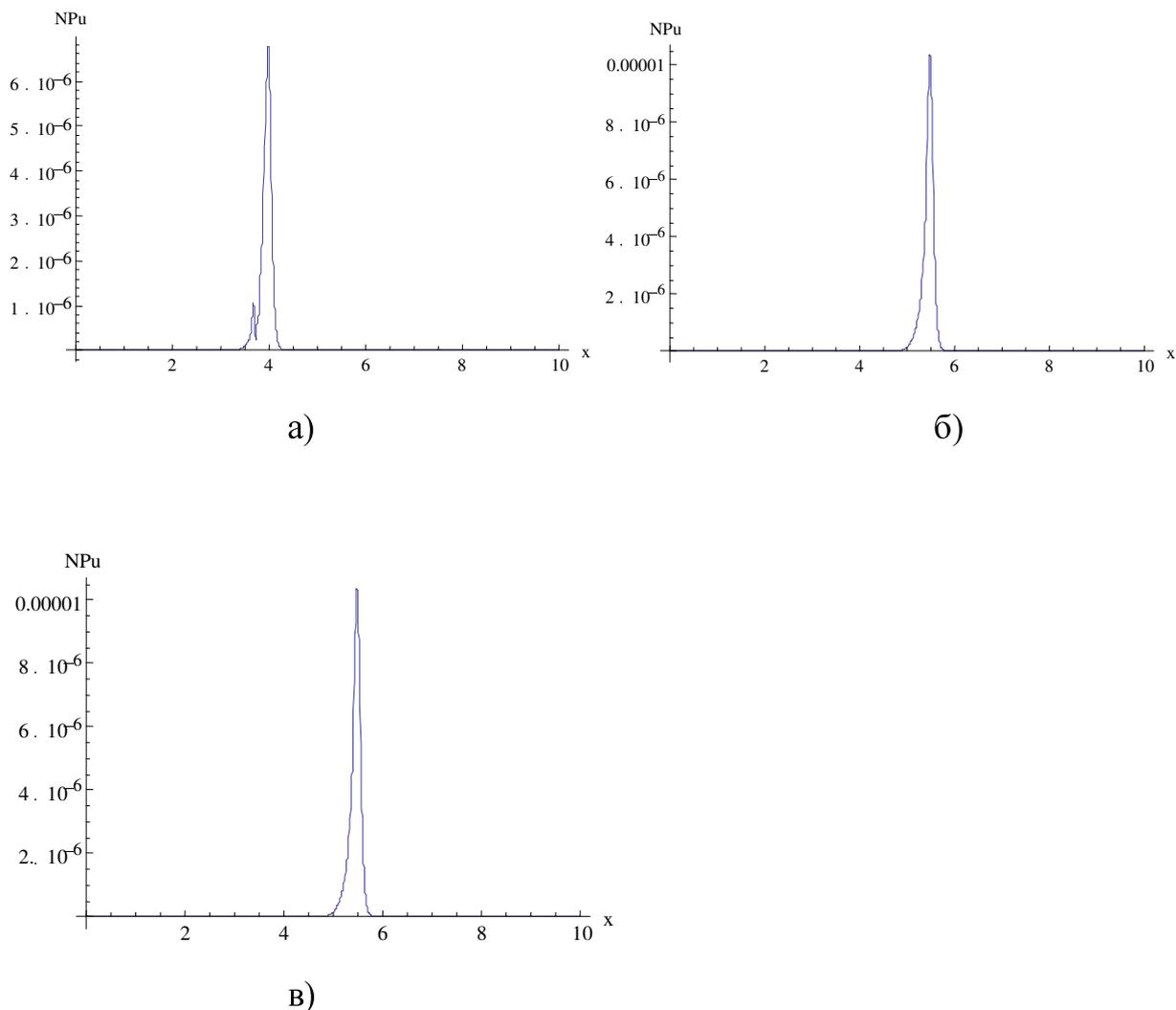


Рис. 2. Кінетика щільності ядер плутонію-239 при хвильовому нейтроно-ядерному горінні природного урану (перший розрахунок): а) залежність обезрозміреної щільності ядер плутонію-239 від просторової координати $N_{Pu}^*(x)$ для моменту часу розрахунку $t = 6$ хв; б) $N_{Pu}^*(x)$ для $t = 12$ хв; в) $N_{Pu}^*(x)$ для $t = 18$ хв.

При другому розрахунку задавалися такі ж самі чисельні значення постійних коефіцієнтів диференціальних рівнянь, які задавалися для першого розрахунку й наведені вище (за винятком ефективних перерізів реакцій радіаційного захоплення нейтронів для осколків і шлаків). У цьому розрахунку ефективні перерізи реакцій радіаційного захоплення нейтронів для осколків і шлаків були збільшені на порядок у порівнянні з першим розрахунком і мають наступні значення: $\sigma_c^{eff(Pu)} = 10,10 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$; $\sigma_c^{eff(5)} = 10,10 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$; $\sigma_c^{eff(5)} = 10,10 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$.

Відзначимо, що перерізи нейтронно-ядерних реакцій для нуклідів, які наведені вище, задавалися їх усередненими значеннями по надтепловій області енергій нейтронів (0,1-7,0 eV).

Представлені в дисертації результати чисельного моделювання хвильового нейтронно-ядерного надповільного горіння природного урану в надтепловій обла-

сті енергій нейтронів свідчать про існування такого режиму. Наприклад, на рис. 2 показана кінетика щільності ядер плутонію-239 при хвильовому нейтронно-ядерному горінні природного урану, що отримана при першому розрахунку.

За результатами чисельного моделювання отримано оцінку фазової швидкості нейтронно-ядерного горіння, що добре узгоджується з вігнерівським розподілом, отриманим у рамках теорії солітонноподібної хвилі повільного ядерного горіння, і наведена на рис. 3.

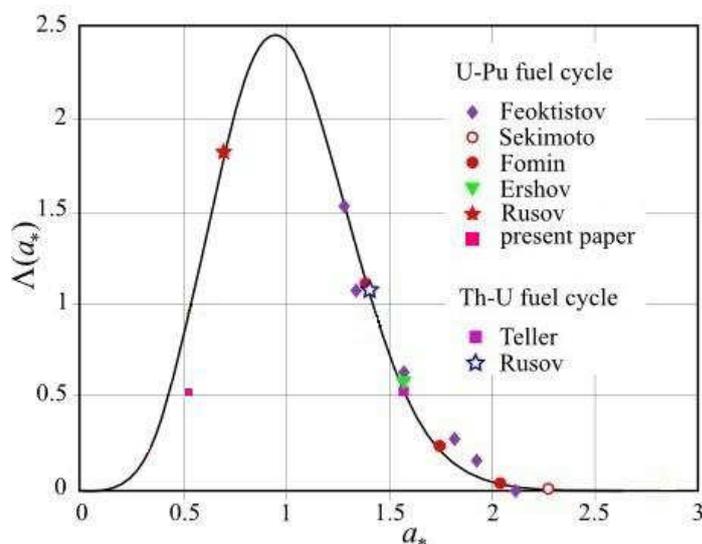


Рис. 3. Теоретична (суцільна лінія) і розрахункова (крапки) залежність для фазових швидкостей нейтронно-ядерного горіння $\Lambda(a_*)=u\tau\beta/2L$ від параметра a_* , доповнена оцінкою, отриманою в даній роботі для надповільного хвильового горіння природного урану в надтепловій області енергій нейтронів (1,0 – 7,0 еВ).

У третьому розділі вперше за допомогою чисельного розв'язання рівнянь теплопереносу з нелінійним тепловим джерелом і теплопровідністю показана реалізація режимів із загостренням в уран-плутонієвому середовищі. Було показано, що щільність теплового джерела, що виражається через усереднені за нейтронним енергетичним спектром перерізів нуклідів, в уран-плутонієвому середовищі залежить від температури ступеневим чином. Для чого були вирішені наступні задачі. Розроблено комп'ютерну програму й проведений розрахунок для основних реакторних паливних нуклідів залежностей перерізів нейтронних ядерних реакцій залежно від енергій нейтронів для широкого діапазону температур (300 К-6000 К) ядерного палива (температурний ефект Доплера) (див. рис. 4). Розроблено комп'ютерну програму й проведені комп'ютерні обчислення для основних реакторних паливних нуклідів $^{235}_{92}\text{U}$, $^{238}_{92}\text{U}$ і $^{239}_{94}\text{Pu}$ усереднених за нейтронними спектрами перерізів основних реакторних нейтронних ядерних реакцій (поділу й радіаційного захоплення) від температури реакторного ядерного палива (рис. 5-7).

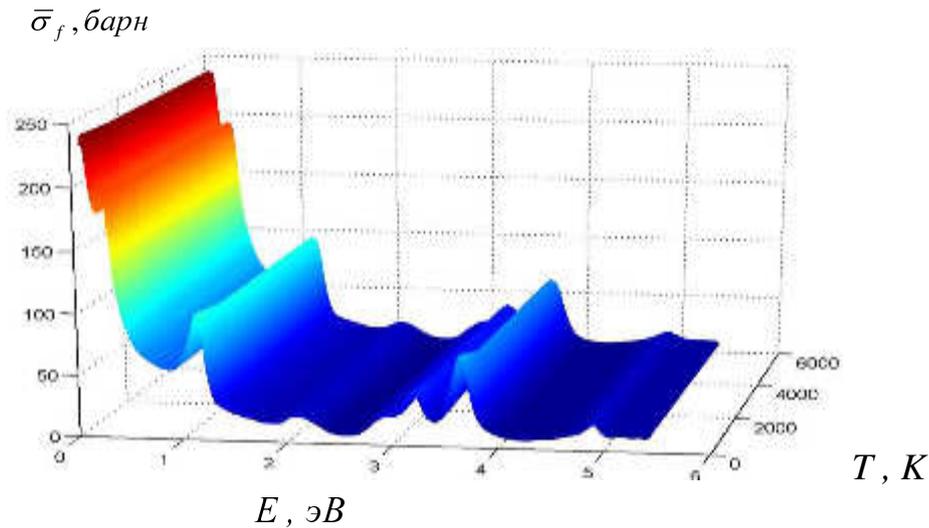


Рис. 4. Ефект Доплера для залежності перерізу поділу ${}^{235}_{92}\text{U}$ нейтронами від їх енергії при зміні T від 300 К до 6000 К.

Причому, уперше виявлений і пояснений резонансний характер залежностей усереднених за нейтронними спектрами перерізів основних реакторних нейтронних ядерних реакцій (поділу й радіаційного захвату) від температури реакторного ядерного палива. Наприклад, для ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ пояснити це можна тим, що у ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ резонансна область починається зі значно більш низьких енергій, ніж для ${}^{235}_{92}\text{U}$ і при збільшенні температури палива відбувається збільшення температури нейтронного газу, що викликає зсуви максимуму максвелівського розподілу нейтронів в бік більших енергій нейтронів, тобто, жорсткість спектра нейтронного газу, при якому кількість нейтронів, що попадає в резонансну область для ${}^{239}_{94}\text{Pu}$, спочатку збільшується, що й викликає зростання усереднених перерізів, а потім по мірі сповзання нейтронного спектра з резонансу падає.

Щільність теплового джерела q задавалася в наступному виді:

$$q = \Phi \sum_i C_i^f \bar{\sigma}_f^i N_i, \quad (22)$$

де Φ - щільність потоку нейтронів, C_i^f - середня кількість тепла, що виділяється при одному поділу нукліда i , $\bar{\sigma}_f^i$ - усереднені перерізи поділу, N_i - концентрації нуклідів.

Отримано розрахункові залежності теплового джерела q для уран-плутонієвого середовища, які для інтервалу температур 300 К – 2500 К, що включає основні робочі температури ядерних реакторів, можуть бути апроксимовані ступеневою функцією за температурою з показником ступеня рівним 2-4, що відповідає режиму із загостренням С. П. Курдюмова, тобто задовольняє вимозі $q(T) = \text{const} \cdot T^{(1+\delta)}$, де $\delta > 1$.

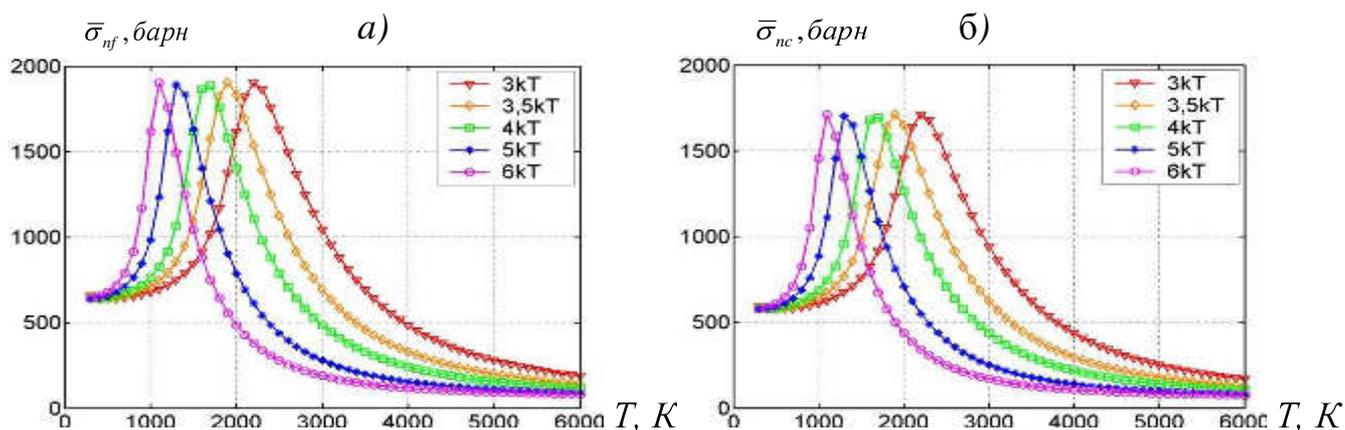


Рис. 5. Залежності перерізу поділу (а) і перерізу радіаційного захоплення (б) ^{239}Pu , усереднених по комбінованому спектру Максвелла і Фермі, від температури середовища для різних значень граничної енергії спектрів Фермі й Максвелла.

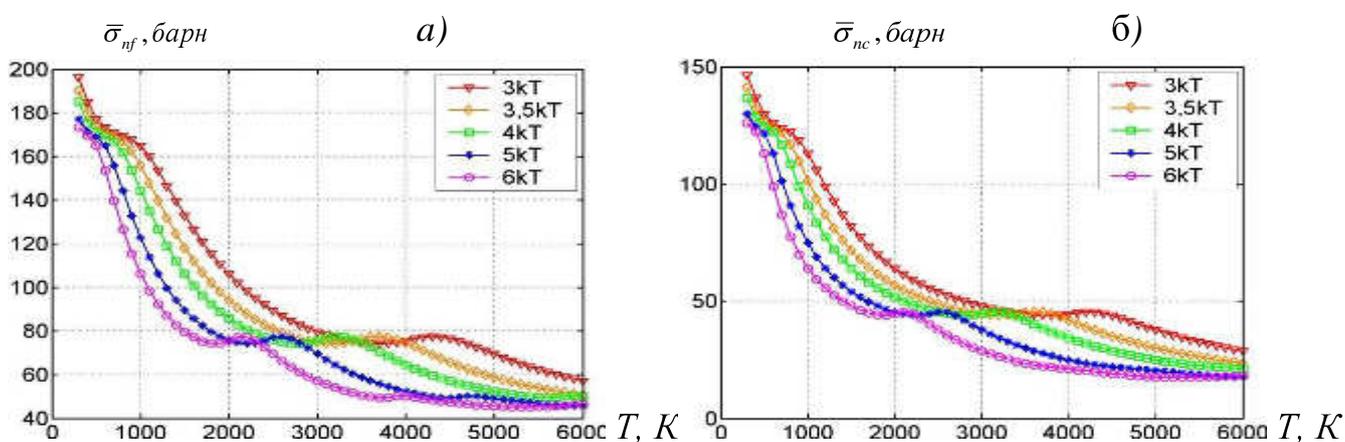


Рис. 6. Залежності перерізу поділу (а) і перерізу радіаційного захоплення (б) ^{235}U , усереднених за комбінованим спектром Максвелла й Фермі, від температури середовища і для різних значень граничної енергії спектрів Фермі й Максвелла.

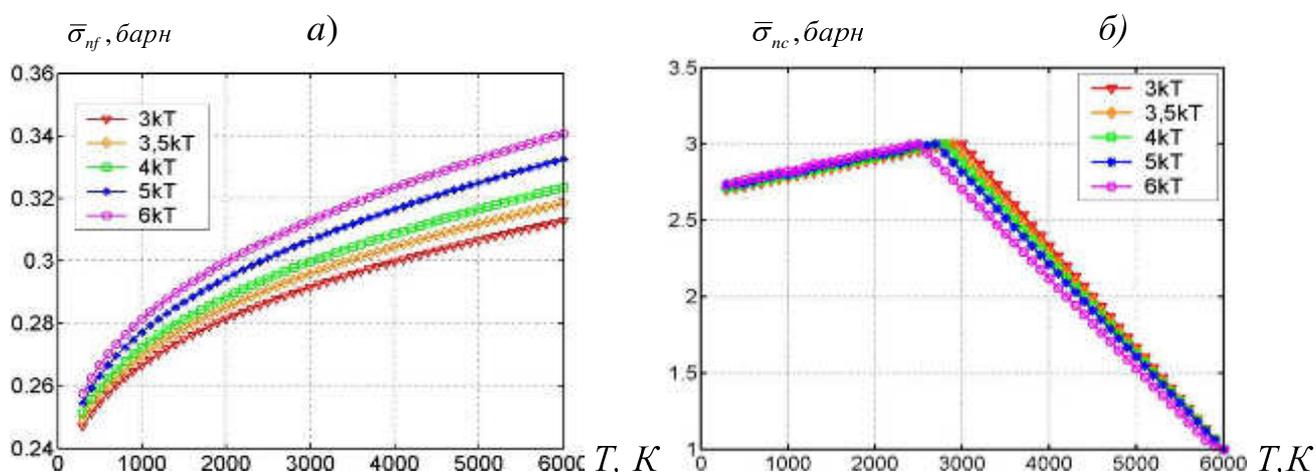


Рис. 7. Залежності перерізу поділу (а) і перерізу радіаційного захоплення (б) $^{238}_{92}\text{U}$, усереднених за комбінованим спектром Максвелла і Фермі, від температури середовища для різних значень граничної енергії спектрів Фермі й Максвелла.

Також отримано розв'язок рівняння тепло переносу з нелінійним ступеневим тепловим джерелом (джерело, що задовольняє вимозі: $q(T) = const \cdot T^{(1+\delta)}$, де $\delta > 1$) в уран-плутонієвому середовищі для граничних і початкових параметрів, відповідних технічним реакторам (наприклад, рис. 8) і для природного геореактора (наприклад, рис.9). Розрахунки проводилися в середовищі математичного моделювання Mathematica 5.21. Було використано переважно методи Рунге-Кута 7-8-го порядку.

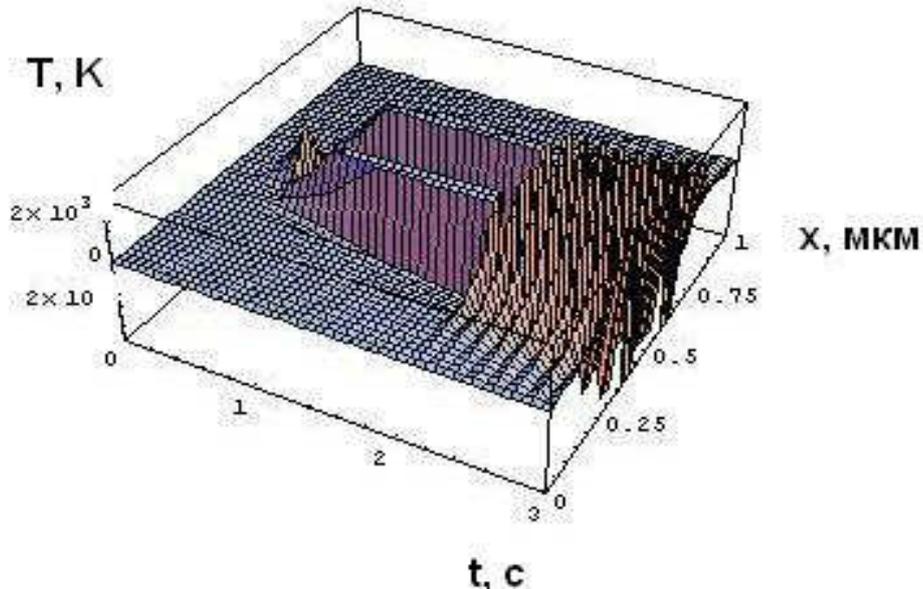


Рис. 8. Розв'язок рівняння теплопереносу для 3-х мірного випадку (джерело пропорційне 2-у степеню температури; $const = 1,00$ Дж/К; початкова і гранична температури дорівнюють 100 К; розміри середовища $0,001 \times 0,001 \times 0,001$ мм).

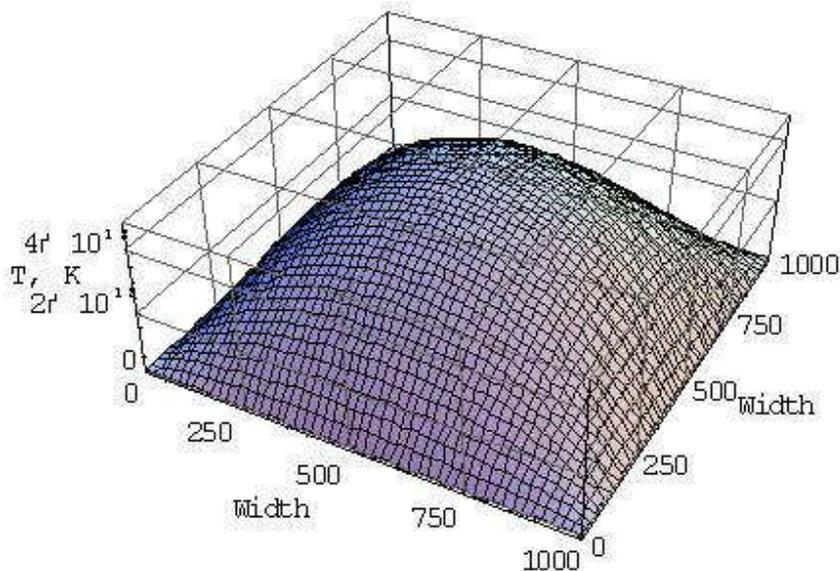


Рис. 9. Розв'язок рівняння теплопереносу для геореактора (джерело пропорційне 2-у степеню температури, $const = 1,00$ Дж/К; початкова і гранична температури дорівнюють 6000 К; середовище - кубик розмірами $10,0 \times 10,0 \times 10,0$ м; наведені результати відповідають моменту часу еволюції температурного поля 0,5 с).

Отримані результати дослідження рівняння теплопереносу для уран-плутонієвого середовища технічних реакторів підтверджують можливість існування режимів із загостренням, а також вказують на можливість локальних розплавлень уран-плутонієвого середовища.

Отримано результати дослідження рівняння теплопереносу для уран-плутонієвого середовища для природного геореактора, що підтверджують можливість існування режимів із загостренням. Показано, що в уран-плутонієвому середовищі геореактора, реалізується *S*-режим, при якому поле температур за короткі часи досягає значень, достатніх для протікання реакцій термоядерного синтезу легких ядер (наприклад, ядер ${}^3_2\text{He}$ і ${}^4_2\text{He}$ й, які можуть породжуватися хвилею ядерного горіння геореактора) і залишається стійким досить тривалий час.

Аналізуючи відомі залежності теплопровідності паливних матеріалах ядерних реакторів та отриману ступеневу залежність для щільності теплового джерела, показано (поки на теоретичному рівні в рамках теорії режимів із загостренням) принципову можливість існування в ядерному паливі реакторів режимів із загостренням з утворенням дисипативних теплових структур.

Режими із загостренням існують також і в розплавленому ядерному паливі. Дійсно, питома теплопровідність для коріуму ядерного реактора задається ступенневою залежністю від температури з показником $\sigma = 2$ і отже, у розплавленому ядерному паливі можуть реалізуватися *S*-режим і *LS*-режим із загостренням.

Режими із загостренням можуть реалізуватися також і в газоподібному ядерному паливі. Дійсно питома теплопровідність для газоподібного стану ядерного палива задається ступенневою залежністю від температури з показником $\sigma = 1/2$ і, отже, у газоподібному ядерному паливі можуть реалізуватися *S*-режим і *LS*-режим із загостренням.

З огляду на дані робіт про можливий склад середовища геореактора у вигляді карбідів ізотопів урану і плутонію, а також що геореактор працює при температурах середовища 4000-6000 К, було розроблено програми, за допомогою яких отримано розрахункові залежності усереднених за спектром нейтронів $\bar{\sigma}_j^i$ перерізів від температури для середовища геореактора.

Так як теплові дисипативні структури в паливі можуть впливати на розподіл радіаційних точкових дефектів у ньому, то було проведено обчислювальні комп'ютерні експерименти по дослідженню спрощеної кінетичної системи для дефектів нелінійної фізичної системи «метал + навантаження + опромінення». Отримані результати підтверджують утворення дисипативних структур точкових дефектів.

Виявлено і пояснено для дослідженого інтервалу температур (300 К – 3000 К) принципова розбіжність температурних залежностей щільностей теплових джерел для МОКС-палива та оксидного уранового палива (рис.10).

Щільність теплових джерел обчислювалась відповідно до виразу (22), причому температурні залежності усереднених за спектром перерізів розраховувалися як за допомогою табличних значень факторів Весткотта (усереднення тільки за тепловим спектром типу Максвелла), так й за допомогою розробленого і наведеного в розд. 3 дисертації методу усереднення перерізів за повним спектром нейтронів. Отримані температурні залежності для щільності теплового джерела паливного

середовища дозволили виявити та обгрунтувати характерні риси аварії на 3-у блоці АЕС «Фукусіма-1».

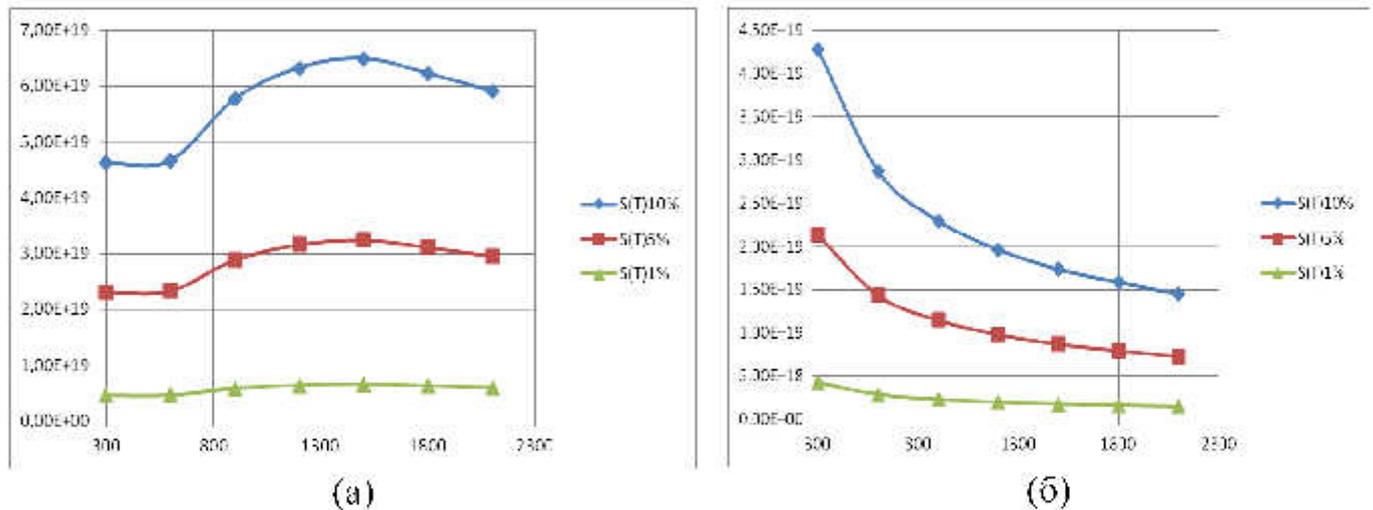


Рис. 10. Залежності щільностей теплового джерела від температури ядерного палива:

(а) -діоксид ^{238}U та ^{239}Pu (МОКС-паливо) з різним збагаченням по ^{239}Pu (1%, 5%, 10%);

(б) - діоксид ^{238}U та ^{235}U з різним збагаченням по ^{235}U (1%, 5%, 10%).

Крім того, уточнена гіпотеза про підпалювання геореактора міжгалактичними протонами високих енергій з урахуванням особливостей надповільного хвильового горіння в надтепловій області енергій нейтронів. З цією метою використано узагальнений критерій нейтронно-ядерного горіння для нейтронних мультипликуючих середовищ, що містять композицію нуклідів, які діляться, що характерно для геореактора. Також висловлено ідею про можливу роль хвилі Ахієзера у підпалюванні хвильового геореактора на ранніх стадіях життя Землі.

ВИСНОВКИ

1. Сформульовано узагальнений критерій для існування хвильових режимів нейтронно-ядерного горіння, що включає в себе як хвилі Ахієзера, так й хвилі Фокстисова.

2. Проведено дослідження виконання критерію хвильового горіння в широкому діапазоні енергій нейтронів для середовища з урану-238, і показано можливість хвильового ядерного горіння не тільки в області швидких нейтронів, але й для холодних, надтеплових і резонансних нейтронів.

3. Отримані результати дослідження виконання критерію Фокстисова для середовища, що складається з урану 238 зі збагаченнями 4,38 %, 2,00 %, 1,00 %, 0,71 % і 0,50% по урану 235, в області енергій нейтронів 0,015 - 10,00 eВ показали існування в області холодних, теплових, надтеплових і резонансних нейтронів режиму повільного хвильового нейтронно-ядерного горіння уран-плутонієвого середовища, яке має збагачення по урану 235, що відповідає підкритичному стану.

4. Для підтвердження справедливості висновків, зроблених на підставі аналізу виконання критерію повільного хвильового нейтронно-ядерного горіння залежно від енергії нейтронів, проведено чисельне моделювання повільного нейтронно-ядерного горіння природного урану в надтепловій області енергій нейтронів (1,0-7,0 eV). Отримані результати підтверджують існування такого режиму в цій області енергій нейтронів.

Таким чином, зроблено обґрунтований розрахунок висновок про можливість створення хвильового ядерного реактора на холодних, теплових, надтеплових і резонансних нейтронах, а не тільки на швидких нейтронах.

5. Виявлено і пояснено резонансний характер залежності усереднених за нейтронними спектрами перерізів основних реакторних нейтронних ядерних реакцій (поділу і радіаційного захоплення) від температури реакторного ядерного палива.

6. Вперше отримані нестационарні дисипативні теплові 3d структури в уран-плутонієвому середовищі.

7. Отримано ступеневу температурну залежність для щільності теплового джерела і показано принципову можливість існування в ядерному паливі реакторів режимів із загостренням з утворенням дисипативних теплових структур.

8. Показано, що легководяні теплові реактори з паливом на природному урані підходять для хвильового горіння плутонію 239. У важководному реакторі на природному урані не буде області, де критична концентрація плутонію була б більше нуля, а, отже, не може виникнути режим повільного хвильового нейтронно-ядерного горіння (хвиля Феоктистова). Це ж відноситься й до реакторів на природному урані з газовим теплоносієм. У цих реакторах можливо повільне хвильове ядерне горіння для палива з таким малим збагаченням по урану-235, щоб в тепловій області енергій існувала б область критичності по плутонію-239, тобто можна використовувати технічний уран або відпрацьоване ядерне паливо з відповідним вигорянням.

СПИСОК ОСНОВНИХ ПУБЛІКАЦІЙ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Rusov V. D. On some fundamental peculiarities of the traveling wave reactor operation / V. D. Rusov, V. A. Tarasov, I. V. Sharf, V. M. Vaschenko, E. P. Linnik, T. N. Zelentsova, M. E. Beglaryan, S. A. Chernegenko et al. // *Science and Technology of Nuclear Installations*. — 2015. — Vol. 2015. — P. 1 – 23; doi: 10.1155/2015/703069.

2. Rusov V.D. Ultraslow wave nuclear burning of uranium-plutonium fissile medium on epithermal neutrons/ V.D. Rusov, V.A. Tarasov, M.V. Eingorn, S.A. Chernezhenko et al. // *Progress in Nuclear Energy*. — 2015. — Vol. 83. — P. 105 – 122

3. Rusov V.D. Traveling Wave Reactor and Condition of Existence of Nuclear Burning Soliton-like Wave in Neutron-Multiplicating Media/ V.D. Rusov, E.P. Linnik, V.A. Tarasov, T.N. Zelentsova, V.N. Vaschenko, S.I. Kosenko, M.E. Beglaryan, S.A. Chernezhenko et al. // *Energies (Special Issue “Advances in Nuclear Energy”)*. — 2011. — 4. — P. 1337 – 1361; doi: 10.3390/en4091337.

4. Русов В.Д. Режимы с обострением в уран-плутониевой делящейся среде технических ядерных реакторов и геореактора/ В.Д. Русов, В.А. Тарасов, С.А. Чернеженко. // Вопросы атомной науки техники. Сер. физика радиац. повреждений и радиац. материаловедение. — 2011. — Вып. 2(97). — С. 123 – 131.

5. Русов В.Д. Критерий волнового ядерного горения для уран-плутониевой делящейся среды и теплового спектра нейтронов ВВЭР/ В.Д. Русов, В.А. Тарасов, С.А. Чернеженко и др. // Вісник Львівського університету. Серія фізична. — 2012. — Вип. 47. — С. 26-39.

6. Rusov V.D. Fukushima plutonium effect and blow-up regimes in neutron-multiplying media/ V.D. Rusov, V.A. Tarasov, V.M. Vaschenko, E.P. Linnik, T.N. Zelentsova, M.E. Beglaryan, S.A. Chernegenko, et al. // World Journal of Nuclear Science and Technology, 2013, №3, p. 9-18.

7. Rusov V.D. KamLand-Experiment and Soliton-Like Nuclear Georeactor. Part 1. Comparison of the Theory with Experiment/ V.D. Rusov, D.A. Litvinov, E.P. Linnik, V.M. Vaschenko, T.N. Zelentsova, M.E. Beglaryan, V.A. Tarasov, S.A. Chernegenko et al. // Journal of Modern Physics, 2013, №4, p. 528-550.

8. Тарасов В.А. Теория диссипативных структур кинетической системы для дефектов нелинейной физической системы «металл+нагрузка+облучение». Часть 1/ В.А. Тарасов, Т.Л. Борилов, Т.В. Крыжановская, С.А. Чернеженко, В.Д. Русов. // Вопросы атомной науки техники. Сер. физика радиац. повреждений и радиац. материаловедение. — 2007. — Вып. 2(90). — С. 63 - 71.

9. Тарасов В.А. Теория диссипативных структур кинетической системы для дефектов нелинейной физической системы «металл+нагрузка+облучение». Часть 2/ В.А. Тарасов, Т.Л. Борилов, Т.В. Крыжановская, С.А. Чернеженко, В.Д. Русов. // Вопросы атомной науки техники. Сер. физика радиац. повреждений и радиац. материаловедение. — 2007. — Вып. 2(90). — С. 72 - 75.

10. Тарасов В.А. Теория диссипативных структур кинетической системы для дефектов нелинейной физической системы «металл+нагрузка+облучение». Часть 3/ В.А. Тарасов, Т.Л. Борилов, Т.В. Крыжановская, С.А. Чернеженко, В.Д. Русов. // Вопросы атомной науки техники. Сер. физика радиац. повреждений и радиац. материаловедение. — 2007. — Вып. 6(91). — С. 18 - 28.

11. Тарасов В.А. Теория диссипативных структур кинетической системы для дефектов нелинейной физической системы «металл+нагрузка+облучение». Часть 4/ В.А. Тарасов, Т.Л. Борилов, Т.В. Крыжановская, С.А. Чернеженко, В.Д. Русов. // Вопросы атомной науки техники. Сер. физика радиац. повреждений и радиац. материаловедение. — 2007. — Вып. 6(91). — С. 29 - 35.

12. Русов В.Д. Функция вероятности резонансного поглощения для нейтрона и мультипликативный интеграл/ В.Д. Русов, В.А. Тарасов, С.И. Косенко, С.А. Чернеженко. // Вопросы атомной науки техники. Сер. физика радиац. повреждений и радиац. материаловедение. — 2012. — Вып. 2(78). — С. 68 – 72.

АНОТАЦІЯ

Чернеженко С.А. Надповільне хвильове нейтронно-ядерне горіння на надтеплових нейтронах і режими із загостренням в уран-плутонієвому середовищі. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук спеціальністю 01.04.16 - фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій. - Одеський національний політехнічний університет, Одеса, 2015.

Дисертацію присвячено визначенню умов існування хвильового нейтронно-ядерного горіння на надтеплових нейтронах і режимів із загостренням в уран-плутонієвому середовищі.

Сформульовано загальний критерій для існування хвильових режимів нейтронно-ядерного горіння як для хвилі Ахієзера, так й для хвилі Феоктистова, і показано, що для середовища з урану 238 можливо існування хвильового ядерного горіння не тільки на швидких, але й на холодних, надтеплових і резонансних нейтронах.

На підставі результатів дослідження виконання критерію Феоктистова для середовища з урану-238 зі збагаченням по урану-235, що відповідає підкритичному стану, показано можливість існування режиму повільного хвильового нейтронно-ядерного горіння уран-плутонієвих середовищ в області холодних, теплових, надтеплових і резонансних нейтронів.

Показано можливість хвильового нейтронно-ядерного повільного горіння природного урану в надтепловій області енергій нейтронів (1,0-7,0 еВ).

Показано можливість створення хвильового ядерного реактора на теплових нейтронах з ядерним паливом із природного урану та урану-238 з різним ступенем збагачення по урану-235. Виявлено і теоретично обгрунтовано резонансний характер залежності усереднених за нейтронними спектрами перерізів основних ядерних реакцій (поділу і радіаційного захвату) в реакторі від температури ядерного палива.

Отримано залежності щільності теплового джерела для уран-плутонієвого середовища і доведено існування режимів із загостренням Курдюмова.

Виявлено нестационарні дисипативні теплові 3d структури в уран-плутонієвому середовищі і показано можливість існування режимів із загостренням для всіх відомих видів реакторного ядерного палива з урахуванням їх теплофізичних властивостей.

Виявлено і пояснено принципову відмінність температурних залежностей щільностей теплових джерел для МОКС-палива та оксидного уранового палива, що дозволило виявити й обгрунтувати характерні риси аварії на 3-му блоці АЕС «Фукусіма-1».

Ключові слова: ядерний реактор, хвиля ядерного горіння, реакторне паливо, відкрита фізична система, теплові дисипативні структури, режими із загостренням.

ABSTRACT

Chernezhenko S.A. Ultraslow wave neutron-nuclear burning under epithermal neutrons and the modes with peaking in the uranium-plutonium fissile environment. – Manuscript.

Thesis for candidate's degree of physical and mathematical sciences by speciality 01.04.16 - nuclear and elementary particles physics and high energy physics. – Odessa National Polytechnic University, Odessa, 2015.

Dissertation is devoted to determination of conditions of the wave neutron-nuclear burning existence under epithermal neutrons and modes with peaking in a uranium-plutonium fissile environment.

A general criterion for existence of the wave modes of the neutron-nuclear burning both for the Akhiezer wave and for the Feoktistov wave is formulated, and possibly existence of the wave nuclear burning in the uranium-238 environment not only under fast but also under cold, epithermal and resonance neutrons is shown.

Based on research results of the Feoktistov criterion fulfillment for the uranium-238 environment, whose enrichment by uranium-235 corresponds to subcritical state, possibility of existence of the slow wave neutron-nuclear burning in a uranium-plutonium environments in energy area of cold, thermal, epithermal and resonance neutrons is shown.

Possibility of the wave neutron-nuclear slow burning in natural-uranium in the energy area of epithermal neutrons (1,0-7,0 eV) is shown.

Possibility of the thermal neutron wave reactor development for a natural-uranium nuclear fuel is shown. Resonant properties of dependence of neutron-spectrum-averaged cross-sections for main nuclear reactor reactions (fission and radiation capture) on the nuclear fuel temperature is found and theoretically substantiated.

Dependences of thermal source density for a uranium-plutonium environment are obtained and existence of the Kurdumov modes with peaking is confirmed.

Non-stationary dissipative thermal 3D structures in a uranium-plutonium fissile environment is found and possibility of the modes with peaking existence is shown for all known types of reactor nuclear fuel taking into account their thermophysical properties.

The distinction of kind between dependences of thermal source density for MOX fuel and uranium oxide fuel is found and explained. This made it possible to find and ground the distinguishing characteristics of accident at the Fukushima I Nuclear Power Plant.

Keywords: nuclear reactor, a wave of nuclear burning, reactor fuel, open the physical system, thermal dissipative structures, modes with peaking.

АННОТАЦИЯ

Чернеженко С.А. Сверхмедленное волновое нейтронно-ядерное горение на надтепловых нейтронах и режимы с обострением в уран-плутониевой среде. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 – физика ядра, элементарных час-

тиц и высоких энергий. – Одесский национальный политехнический университет, Одесса, 2015.

Впервые сформулирован общий критерий существования волновых режимов нейтронно-ядерного горения как для волны Ахиезера, так и для волны Феокистова.

Для делящейся среды состоящей из урана 238 проведены исследования выполнения критерия волнового горения в широком диапазоне энергий нейтронов и обнаружена возможность волнового ядерного горения не только для быстрых, но и для холодных, надтепловых и резонансных нейтронов.

Представлены результаты исследования выполнения критерия Феокистова для делящейся среды, состоящей из урана 238 с обогащениями 4,38 %, 2,00 %, 1,00 %, 0,71 % и 0,50% по урану 235, в области энергий нейтронов 0,015 – 10,00 эВ. Эти результаты свидетельствуют о возможности существования в области холодных, тепловых, надтепловых и резонансных нейтронов режима медленного волнового нейтронно-ядерного горения уран-плутониевых сред при обогащении по урану 235, соответствующему подкритическому состоянию.

Для подтверждения справедливости выводов, основанных на анализе выполнения критерия медленного волнового нейтронно-ядерного горения в зависимости от энергии нейтронов, проведено численное моделирование медленного нейтронно-ядерного горения природного урана в надтепловой области энергий нейтронов (1,0-7,0 эВ). Представленные результаты численного моделирования волнового нейтронно-ядерного медленного горения природного урана в надтепловой области энергий нейтронов доказывают существование такого режима.

Получены нестационарные диссипативные тепловые 3d структуры в уран-плутониевой делящейся среде, т.е. показано существование режимов с обострением Курдюмова. При этом впервые обнаружен и объяснен резонансный характер зависимостей усредненных по нейтронным спектрам сечений основных реакторных нейтронных ядерных реакций (деления и радиационного захвата) от температуры реакторного ядерного топлива, а также нелинейный степенной характер зависимости плотности теплового источника от температуры для уран-плутониевой делящейся среды.

Показана возможность существования режимом с обострением в топливных материалах ядерных реакторов. Для всех известных видов реакторного ядерного топлива с учетом их теплофизических свойств определены возможные режимы с обострением.

Впервые обнаружено и объяснено для исследованного интервала температур (300 К – 3000 К) принципиальное различие температурных зависимостей плотностей тепловых источников для МОКС-топлива и оксидного уранового топлива. Полученные температурные зависимости для плотности теплового источника делящейся топливной среды позволили выявить и обосновать характерные особенности аварии на 3-м блоке АЭС «Фукусима-1».

Уточнена гипотеза о поджиге природного геореактора межгалактическими протонами высоких энергий с учетом особенностей сверхмедленного волнового горения в надтепловой области энергий нейтронов. Кроме того, предложена идея о

возможной роли волны Ахиезера в поджиге природного волнового геореактора на ранних стадиях жизни Земли.

Ключевые слова: ядерный реактор, волна ядерного горения, реакторное топливо, открытая физическая система, тепловые диссипативные структуры, режимы с обострением.