СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ „СВ. КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ“

ФАКУЛТЕТ ПО ФИЗИКА

КАТЕДРА АТОМНА ФИЗИКА –ЯДРЕНА ТЕХНИКА И ЕНЕРГЕТИКА

Анализ на неопределености при пускови неутронно-физични експерименти на ВВЕР- 1000

АЛЕКСАНДЪР ВАСИЛИС ПИМПАС

СПЕЦИАЛНОСТ: ЯДРЕНА ТЕХНИКА И ЕНЕРГЕТИКА

ФАКУЛТЕТЕН № 130072

Научен ръководител:

Гл. асистент Пламен Петков

.....

СОФИЯ

МАРТ 2021

Съдържание

1 УВОД 4

2 ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИПЛОМНАТА РАБОТА 5

3 ПУСКОВИ ФИЗИЧНИ ИЗПИТАНИЯ НА ВВЕР-1000 6

4 ОПИСАНИЕ НА ОБОРУДВАНЕТО НА ВВЕР-1000, ИЗПОЛЗВАНО ЗА КОНТРОЛ НАД ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧНИТЕ ПРОЦЕСИ ПО ВРЕМЕ НА ИЗЛИЗАНЕ НА ДЪЛБОКОПОДКРИТИЧЕН РЕАКТОР В КРИТИЧНО СЪСТОЯНИЕ НА МКН И ПО ВРЕМЕ НА ПРОВЕЖДАНЕ НА ФИЗИЧНИТЕ ПУСКОВИ ИЗПИТАНИЯ 7

4.1 Щатна апаратура за контрол на неутронния поток 7

4.1.1 Общо описание на системата 7

4.1.2 АКНП за СУЗ 8

4.1.3 Система за контрол на презареждане на горивото 8

4.2 Апаратура за контрол на реактивността 8

4.3 Нещатна апаратура за провеждане на пускови физични изпитания 10

5 ОПИСАНИЕ НА ПРОГРАМАТА SERPENT. РАЗРАБОТЕНИ МОДЕЛИ НА ТОПЛООТДЕЛЯЩИ КАСЕТИ 10

5.1 Описание на програмата Serpent 10

5.2 Разработени модели на топлоотделящи касети 11

6 РЕАКТИВНОСТ. ПРЕСМЯТАНЕ НА РЕАКТИВНОСТ ЧРЕЗ РЕАКТИМЕТРИ НА ОСНОВАТА НА ОБЪРНАТОТО РЕШЕНИЕ НА УРАВНЕНИЯТА НА КИНЕТИКАТА 12

6.1 Реактивност 12

6.1.1 Реактиметри и неопределености при оценяване на реактивността 12

7 МКН (МИНИМАЛНО КОНТРОЛИРУЕМО НИВО НА МОЩНОСТ). 15

7.1.1 Цели и задачи на изпитанието 15

7.1.2 Основни технологични процеси по време на излизане на РУ на МКН на мощност 15

7.2 Обработка и анализ на данните за борната концентрация, неутронната мощност и реактивността по време на водообмен с цел достигане на МКН за 24-та кампания, 6-ти блок на „АЕЦ Козлодуй“. 16

7.2.1 Анализ на експлоатационните данни за пресметнатата неутронна мощност и реактивност от АКР 17

7.2.2 Анализ на експлоатационните данни за концентрацията на борна киселина в топлоносителя на първи контур 21

7.3 Симулиране на хода на реактивността по време на водообмен за МКН на мощност чрез Монте Карло симулации на програма Serpent 25

7.4 Анализ на данните от изпитанието за оценка на ефективността на аварийната защита. Монте Карло симулация на падане на АЗ 26

8 РЕЗУЛТАТИ 28

9 ЗАКЛЮЧЕНИЕ 28

ЛИТЕРАТУРА 29

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 31

ПРИЛОЖЕНИЕ 2 32

ПРИЛОЖЕНИЕ 3 35

ПРИЛОЖЕНИЕ 4 ..... **36**
ПРИЛОЖЕНИЕ 5 ..... **38**
ПРИЛОЖЕНИЕ 6 ..... **40**
ПРИЛОЖЕНИЕ 7 ..... **42**
ПРИЛОЖЕНИЕ 8 ..... **43**
ПРИЛОЖЕНИЕ 9 ..... **44**
ПРИЛОЖЕНИЕ 10 ..... **45**
ПРИЛОЖЕНИЕ 11 ..... **49**

1 Увод

Големите ядрени и радиационни аварии в последните петдесет години потвърждават нуждата от непрестанно подобряване на техническите и организационните мерки, както и нормативната база и подходите за осигуряване на безопасността при експлоатация на ядрени съоръжения. Лицензиантите, експлоатиращи ядрени съоръжения по смисъла на закона за безопасното използване на ядрената енергетика, са задължени да разработват и следват политика, в която безопасността е най-висок приоритет. [1]

С цел осигуряване на ядрената безопасност и в съответствие с нормативната и техническата документация, всяка конкретна горивна кампания в „АЕЦ Козлодуй“ се проектира. Според Наредбата за осигуряване на безопасността на ядрените централи: „Стойностите на коефициентите на реактивност по специфичен обем на топлоносителя, температура на топлоносителя и горивото и по мощност на реактора трябва да бъдат отрицателни в целия диапазон на изменение на параметрите на контура на топлоносителя на реактора при всички експлоатационни състояния и проектни аварии“ [2]. В началото на всяка горивна кампания след презареждане, предварително изчислени неутронно-физични характеристики на активната зона се подлагат на проверка чрез пускови физични експерименти и сравнение на резултатите. Неопределеностите в резултатите на физичните експерименти са сложни за оценяване и са слабо застъпени в практиката на ядрените електрически централи (ЯЕЦ).

Историята на Монте Карло методите започва още през 30-те години на двадесети век, когато Енрико Ферми опитва да приложи метода, докато изучава неутронния пренос. През 40-те години Станислав Улам разработва модерната версия на верижния марковски Монте Карло метод, докато работи по разработването на ядрени оръжия в лабораторията Лос Аламос. Джон фон Нюман, който също работи по проекта Манхатън, разбира важността на работата на Улам, и веднага програмира наличният им компютър да пресмята по този начин [3]. В днешни дни, при наличието на все по-мощни компютри, Монте Карло методите се прилагат в реакторни изследвания, в радиационната защита и медицинската физика, както и за фундаментална наука и метрология. Една от утвърдилите се програми базирана на метода Монте Карло за реакторни симулации е финландската Serpent, която е използвана в дипломната работа.

В настоящата дипломна работа са разгледани две от пусковите-физични изпитания-излизане на минимално контролируемо ниво на мощност след ПГР и оценка на ефективността на аварийната защита. Обработени са експлоатационните данни от експериментите и е направен анализ на неопределености в данните и резултатите.

Разработени са два опростени модела на топлоотделящи касети: касета със средно обогатяване 4,62% и касета с обогатяване 4,0% под формата на входящи файлове за програмата Serpent, с чиято помощ е симулиран ходът на реактивността по време на водообмен с цел излизане на РУ на МКН на мощност и е направена оценка за критичната борна концентрация. Имитирано е също спускане на аварийната защита с цел опит за определяне на ефективността и.

2 Цел и задачи на дипломната работа

Целта на дипломната работа е анализ на данни и свързаните с тях неопределености при два от пусковите неутронно-физични експеримента на реактор ВВЕР-1000 и създаване на два модела на топлоотделящи касети, с цел Монте Карло симулация на ходът на реактивността по време на експериментите чрез програмата Serpent.

За изпълнение на целта са поставени следните задачи:

1) Запознаване с основите на физичните и технологични процеси по време на изпитанията, както и с документацията, която регламентира реда и условията на извършването им.
2) Запознаване с устройството и характеристиките на апаратурата, с която се упражнява контрол по време на експериментите и се оценява крайния им резултат.
3) Запознаване с възможностите на програмата Serpent и усвояване на основни нейни функционалности.
4) Разработване на двуизмерени модели на топлоотделящи касети с цел симулиране на хода на реактивността по време на водообмен до излизане на МКН на мощност и оценка на критичната борна концентрация. Симулиране на аварийната защита.
5) Идентификация, обработка и анализ на данните, получени по време на пусковите експерименти за реактивност, неутронен поток и борна концентрация.
6) Извършване на пресмятания за реактивност и реактивностни коефициенти с програмен комплекс КАСКАД.
7) Анализ на неопределености при разгледаните пускови-физични експерименти.

3 Пускови физични изпитания на ВВЕР-1000

При всеки пуск на реактор ВВЕР-1000 след ПГР и презареждане на горивото се провеждат редица физични изпитания, целящи експериментална проверка на предварително оценени неутронно-физични характеристики на активната зона, потвърждаващи условията за безопасна експлоатация на реакторната установка от неутронно-физична гледна точка [4] [5]. По време на неутронно-физичните изпитания се измерват коефициенти и ефекти на реактивността, диференциални и интегрални характеристики на органите за регулиране, ефективност на АЗ [5]. За тази цел са обезпечени редица работни програми и процедури в рамките на програмата за пуск на блока след ПГР, осигуряващи безопасните и оптимални действия на персонала с цел безопасно извеждане на дълбоко подкритичния реактор на минимално контролируемо ниво на мощност и достигане и поддържане на условията, нужни за провеждане на физичните изпитания. Освен документално осигуряване е нужен и обучен и лицензиран персонал, както и апаратура, подходяща за измерване и регистриране на технологичните параметри, токове от йонизиращите камери на блоковете за детектиране и пресметнатите реактивности с нужната точност.

В „АЕЦ Козлодуй" се провеждат следните пускови физични експерименти на МКН в началото на горивната кампания [4]:

- Извеждане на реактора на МКН след ПГР
- Проверка на зацепването на задвижването на ОР СУЗ
- Измерване на изотермичния коефициент на реактивност
- Измерване на диференциалната и интегрална ефективност на управляващата група ОР СУЗ
- Измерване на ефективността на аварийната защита без МЕК в режим АЗ

Програмата от пускови физични експерименти се смята за успешна, тогава когато съвпадението между пресметнатите и експерименталните резултати е в рамките на предварително зададените критерии за успешност [6]. Резултатите и сравненията се анализират и представят в отчет. Отчетът още включва резултатите от програмата за оценка на симетричността на активната зона при мощности около 1192MW и 2455MW (удостоверява правилността на зареждането на горивото), както и резултатите от контрола върху разпределението на енергоотделянето в активната зона на мощност 3056 MW. Контролът се състои в сравнение на експлоатационните стойности на топлинната мощност по касети получени от СВРК по КНИ, възстановени от СВРК и възстановени от програмата ПИР–А по КНИ с данните от пресмятания на програмата БИПР-7А [6].

Под МКН в технологичния регламент на всеки енергиен блок е дадена дефиниция, която характеризира състоянието на РУ чрез набор от стойности на основни технологични параметри [7]:

- Неутронна мощност на реактора в диапазона : 10^{-7} до 1% от номиналната мощност

- Концентрацията на борна киселина в първи контур е равна на текущата, съответстваща на критично състояние
- Температурата на топлоносителя в първи контур е в диапазона : 260 до 280 градуса Целзий
- Налягането на топлоносителя в първи контур е: 15,5 до 15,9 MPa
- Нивото на топлоносителя в компенсатора на обема: 5550 до 5850 мм
- В работа са не по-малко от две главни циркулационни помпи
- Налягането в парогенераторите е в диапазона: 6,07 до 6,47 MPa
- Нивото на топлоносителя в парогенераторите е равно на номиналното с допустими отклонения от 50 мм

В програмата за извеждане на реактора в критично състояние на МКН след презареждане на горивото, както и в процедурите за извършване на физичните изпитания са зададени необходимите изходни стойности на параметрите за започване на работа, които отговарят на състояние МКН на РУ според технологичния регламент, но са зададени в по-тесни допустими диапазони [8].

4 Описание на оборудването на ВВЕР-1000, използвано за контрол над физико-технологичните процеси по време на излизане на дълбоко подкритичен реактор в критично състояние на МКН и по време на провеждане на физичните пускови изпитания

За контрол на физико-технологичните процеси, съгласно работната програма за извеждане на реактора в критично състояние на МКН, се проследява нарастването на неутронния поток във времето по апаратурата за контрол на неутронния поток (АКНП), периода на реактора изчислен от АКНП, показанията за реактивност по апаратурата за контрол на реактивността (АКР) [8].

4.1 Щатна апаратура за контрол на неутронния поток

4.1.1 Общо описание на системата

Комплексът АКНП е щатната система за измерване на неутронния поток в целия диапазон на неговото изменение (10^{-7}÷120% Nном) и пресмятане на периода на реактора, по скоростта на изменение на неутронния поток, във всички състояния на РУ. Формира защитни сигнали по период и мощност на реактора, с цел намаляването на неутронната мощност при превишаване на зададените уставки [9]. Апаратурата за контрол на неутронния поток се състои от три автономни подсистеми: система за контрол на неутронния поток за системите за управление и защита (АКНП за СУЗ, 2 комплекта), система за контрол на презареждане на горивото (СКП, 2 комплекта), система за контрол на неутронния поток за резервния щит за управление (РЩУ, 1 комплект).

4.1.2 АКНП за СУЗ

Системата АКНП за СУЗ, сигналите от която се използват в системата за управление и защита на реактора, работи в режим на постоянен контрол на неутронния поток. Целият диапазон на контрол на плътността на неутронния поток условно е разбит на три под-диапазона: пусков ПД, работен логаритмичен РД1, работен линеен РД2 (Приложение 1). Всеки комплект на системата се състои от 3 измервателно-технологични канала, чиито детектори са разположени под ъгъл 120° по напречното сечение на реактора, за всеки комплект аварийна и предупредителна защита. Всеки канал използва по два вида детектиращи блока за регистрация на топлинния поток неутрони - БДЛН-14Р3 и БДЛН-26Р1. На 895 мм под центъра на активната зона се намират детектиращите блокове БДЛН-14Р3, които работят на основата на йонизационна камера на делене КНК-15, с делящ изотоп U^{235} (с чувствителност: 1 $imp.n^{-1}.cm^2$, 10^{-7} % $N_{NOM} \div 10^{-1}$ % N_{NOM}, в импулсен режим и $2{,}6.10^{-13}$ $A.n^{-1}.cm^2.s$, 10^{-3} %N_{NOM} ÷ 100 %N_{NOM} , в токов режим). На 1215 мм над центъра на активната зона се намират детектиращите блокове БДЛН-26Р1, които работят на основата на йонизационна камера на активация КНК-53М, с активационен изотоп B^{10}. Изходните сигналите от детекторите БДЛН-14Р3 се използват в ПД (импулсен режим) и РД2 (токов режим, а изходните сигнали на БДЛН-26Р1 в РД1 и РД2 в токов режим.

Основен елемент в състава на АКНП са устройства за натрупване и обработка (УНО, по едно за всеки канал АКНП за СУЗ). УНО обработва изходните сигнали на блоковете за детектиране, формира дискретни сигнали за аварийна и предупредителна защита по период и мощност, формира сигнали за намаляване на неутронната мощност по период и мощност – ‘‘РМ-Р” и “РМ-Т”, формира аналогови сигнали за системата за вътрешен реакторен контрол (СВРК), апаратурата за регулация и и ограничение на мощността (АРОМ), за апаратурата за регулиране на мощността (АРМ), както и за АКР.

4.1.3 Система за контрол на презареждане на горивото

Системата се състои от два комплекта, всеки с по три измервателно-технологични канала, работещи в пусков диапазон. Блоковете за детектиране (БД) на СКП (БДПН-19Р) са предназначени за преобразуване на ниски нива на плътност на потока топлинни неутрони в импулсен сигнал. В тях са използват коронни броячи СНМ-18-1, по три брояча на БД. Блоковете за детектиране БДПН-19Р по време на презареждане или пуск на реактора се установяват в каналите на нивото на центъра на активната зона (ЦАЗ). В период на спиране на реактора, вдигането на БД се допуска не по-рано от 72 часа след спирането на реактора за презареждане. След планово презареждане на реактора, БД на СКП се установяват в долно положение. В период на пуск на реактора блоковете за детектиране трябва да са в горно положение до $N_{ру}=1.10^{-6}$ %$N_{ном}$, след което блоковете за детектиране трябва да се поставят в долно положение.

4.2 Апаратура за контрол на реактивността

Апаратурата за контрол на реактивността е предназначена за пресмятане, изобразяване и регистрация на реактивността в ЯЕЦ с реактори ВВЭР-1000 [10] [11]. Входните сигнали за АКР са импулсните сигнали, пропорционални на плътността на

неутронния поток, формирани от щатната апаратура за контрол на неутронния поток и от системата за контрол на презареждането. Апаратурата на АКР се състои от три независими изчислителни канала. Всеки канал има три входа за приемане на импулсните сигнали от АКНП и е свързан с една от стойките УНО-64Р1 (АКНП – I к-т). Импулсните сигнали от 3-те канала на система СКП от стойките УНО-65Р1 също се подават на АКР.

Изходните сигнали на АКНП, явяващи се входни за АКР попадат в блок за съгласуване БИЭ-16Р, откъдето след усилване биват подавани на УНО-185Р. УНО измерва честотата на приеманите сигнали, изчислява реактивността на всеки 0,1s и предава получената стойност в цифров вид за изобразяване на блока за цифрова индикация БИЦ-53Р, намиращ се на БЩУ. На БИЦ-53Р реактивността е представена в единици $\beta_{еф}$ до четвъртия знак след десетичната запетая, във вид: ±00.0000 $\beta_{еф}$. Диапазонът на измерване е от -25.0000 до +01.0000$\beta_{еф}$.

Работоспособността на АКР се проверява по време на плановите годишни ремонти, като част от програмата за обследване състоянието на система АКНП. За целта се използва възелът ПГТ-15Р, съвместно с персонален компютър, осцилограф и честотомер. ПГТ-15Р се използва като имитатор на реактивност, предназначен за проверка работата и точността на АКР, формирайки електрически импулси: 0-5 V, 0-100 kHz, дължина 2 микросекунди, имитирайки сигнали от АКНП. Проверява се амплитудата и дължината на имитираните импулси , както и съответствието между имитираната честота на импулсите и реално измерената такава. Относителната грешка при измерването на честотата не трябва да надвишава 0,1%. За оценка на неопределеността в изчислената реактивност се въвежда желаната стойност на имитираната реактивност и имитаторът генерира за избран период от време поредица от импулси с начална и крайна честота, чиято промяна във времето е пропорционална на имитираната реактивност. Сравнява се оценената реактивност с имитираната, като относителната неопределеност трябва да бъде под 2%. АКР се счита издържала проверката, ако измерените реактивности са в определените граници.

Съгласно [11] [12] по време на ПГР преди пуск на шести блок през 2018г. е извършено техническо обследване на апаратурата на АКР и резултатите представени в [13] и [14] са добра оценка за инструменталната неопределеност на реактивността, изчислена от АКР. Резултатите от измерванията за ПД с входен сигнал от СКП и АКНП са представени в Приложение 2 [13] [14].

При анализ на резултатите се вижда, че точността на измерване на честотата на входния сигнал е задоволителна и тази неопределеност е пренебрежима. Резултатите показват, че неопределеността в оценката на реактивността е най-ниска около нулевата стойност (критично състояние) и се увеличава с отдалечаване от нулата в положителна и отрицателна посока, като най-висока е при въвеждане на големи отрицателни реактивности, като тези при падане на аварийната защита. Обект на интерес за дипломната работа са неопределеностите при оценка на реактивността в пусков диапазон с входящ сигнал от СКП и пусков диапазон с входящ сигнал от АКНП. Консервативен подход би бил да се приеме инструментална неопределеност от 2% за въвеждане на големи по стойност отрицателни реактивности.

4.3 Нещатна апаратура за провеждане на пускови физични изпитания

Апаратурата се състои от три детектиращи блока КНК-4 с йонизационни камери тип газов емитер на базата на ^{3}He (с чувствителност ~1.0*10^{-13} A.n^{-1}.cm^{2}.s, 10^{-4} %N_{NOM} ÷ 100.0 % $N_{NOM,}$ в токов режим). Камерите са разположени на нивото на ЦАЗ, като трите аналогови токови сигнали на изхода на камерите постъпват на входа на реактиметър ЦВР-8. ЦВР-8 разполага само с един аналогов вход, за това трите тока се събират преди да постъпят за изчисление на реактивността. Освен това, към реактиметъра се подвързва и персонален компютър със специализиран софтуер за запис и обработка на данните от ЦВР-8. Реактивността може да бъде изчислявана в реално време, както и в последствие от масива записани данни за входния ток. Останалата част от състава на апаратурата е цифров самописец-мултимер Honeywell Multitrend SX, подвързан към персонален компютър със софтуер за запис и обработка на данни (PC Trend Server Pro). Самописеца се използва за измерване и визуализиране на данни като налягане в реактора, температура на активната зона, ниво в КО и други.

5 Описание на програмата Serpent. Разработени модели на топлоотделящи касети.

5.1 Описание на програмата Serpent

Serpent представлява многоцелева програма (триизмерен транспортен код) за симулиране на пренос на фотони и неутрони през многомерни хетерогенни среди чрез Монте Карло методика. Проектът е финландска разработка, започнал през 2004 година, разработен на езика ANCI-S под операционна програма Linux, с цел реакторно моделиране на ниво топлоотделящи касети и генерация на групови константи за детерминистични транспортни кодове. С разрастването на проекта и все по-голямата му популяризация, в днешни дни кодът се ползва освен за реакторни приложения (пресмятане на критичности, моделиране на изследователски реактори, изследване на горивни цикли, валидация на детерминистични транспортни програми, пресмятане на дълбочина на изгаряне и изотопен състав), така и за симулиране на пренос на фотони и неутрони с цел пресмятане на радиационни защити и други приложения в областта на медицинската физика. Предвидено е комбинирането на резултатите с други физични пресмятания за решаване на многокомпонентни физични задачи.

Подобно на други Монте Карло транспортни кодове, геометрията в Serpent се задава чрез Constructive Solid Geometry (CGS) моделиране, използващо булеви оператори за комбиниране на по-прости форми с цел създаване на сложни повърхности или обекти, позволяващо моделирането на всякакви двуизмерни и триизмерни горивни или реакторни конфигурации. В Serpent геометрията се дефинира чрез хомогенни клетки, образувани от прости повърхности свързани чрез булеви оператори. Този вид моделиране силно улеснява създаването на симетрични и повтарящи се в пространството модели като горивни решетки.

Серпент проследява „историята“ на всяка една частица, симулирайки взаимодействията и с моделираната среда чрез генериране на случайни числа и базирайки се на заложените физични модели на взаимодействие. Процедурата на проследяване на частиците може да се обясни чрез три основни стъпки: генериране на случайна дистанция до следващото взаимодействие, транспортиране на частицата до точката на взаимодействие, генериране на случайно взаимодействие. В случай на разсейване, процедурата започва отначало, като частицата придобива нова посока и енергия. При транспортиране на частицата през хомогенен материал, вероятността за взаимодействие на единица изминат път се описва чрез макроскопичното сечение на материала.

При преминаването на частицата от една среда в друга, в Serpent се използват два метода за проследяването и - Surface Tracking и Woodcock deltra-tracking. При Surface Tracking метода, трекът на частицата на границата на две среди се прекратява и се генерира нов пробег до взаимодействие, пропорционален на макроскопичното сечение на новата среда. За спирането на частицата на границата между две среди, алгоритъмът трябва да пресметне разстоянието до най-близката повърхност, изчислявайки разстоянията до всички близки повърхности и избирайки най-малката стойност. Тази методика се използва във всички Монте Карло транспортни кодове. Програмата дава избор на потребителя кой метод да бъде използван за кои среди от модела.

5.2 Разработени модели на топлоотделящи касети

За целите на настоящата дипломна работа бяха разработени два двуизмерни модела на топлоотделящи касети, използвани в реактори ВВЕР-1000 - модел на касета със средно обогатяване 4,62% и друга касета с обогатяване 4.0%, с цел проверка на възможността за симулиране на хода на реактивността при два от неутронно-физичните пускови експеримента на реактор ВВЕР-1000. Една от създадените и използваните модификации на модела на касета със средно обогатяване 4,62% под формата на входен файл за Serpent е представена в Приложение 10.

Моделираните касети се състоят от основни техни компоненти важни за размножаващите им свойства, дефинирани с висока точност по размер, плътност и материален състав. Топлоотделящите елементи са моделирани от циркониева сплав с основните по масова фракция легиращи елементи и примеси. Вътрешността им е детайлно моделирана, като включва гориво, централен отвор (при горивните таблетки с изгарящ поглътител) запълнен с хелий, както и междина между горивото и обвивката, запълнена с хелий. Горивото е представено с основните изотопи на урана и кислород, както и изгарящ поглътител под формата на гадолиниев оксид с всички основни изотопи на гадолиния. Добавени са също направляващите канали, както и централната тръба, изградени от различни циркониеви сплави с техните съответстващи основни по масова фракция легиращи елементи и примеси. Топлоносителят се състои от водород, кислород, и двата основни изотопа на бора, бор-10 и бор-11. Моделираните конфигурации са визуализирани чрез вградения в Serpent plotter и са представени в Приложение 7.

6 Реактивност. Пресмятане на реактивност чрез реактиметри на основата на обърнатото решение на уравненията на кинетиката

6.1 Реактивност

В реакторната физика и най-вече в експлоатацията на ядрените реактори се е наложила полезна за управление на РУ величина, наречена реактивност. Тя носи информация за нарастването на неутронния поток в реално време и е безразмерна, недиректно измерима величина, оценявана от реактиметри.

6.1.1 Реактиметри и неопределености при оценяване на реактивността

Основата на пусковите физични експерименти се свежда до оценяване на реактивността при подходящи условия, която е функция на всички параметри на зоната, като температура на горивото и топлоносителя, концентрацията на борната киселина, положение на ОР СУЗ, налягане на топлоносителя и други [5]. По време на физичните експерименти се записват данните от различни детектори, които се привързват по време и се оценява промяната на реактивността за единица време, както и промяната на интересуващия ни параметър за единица време в един и същ времеви интервал [5]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} = \frac{\partial \rho / \partial t}{\partial x / \partial t}$$

(6.1)

Един от широко разпространените методи за пресмятане на реактивността от реактиметри е на основата на обърнатото решение на уравненията на точковата кинетиката. Задачата, която решават реактиметрите е намирането на решение на следната система от уравнения:

$$\begin{cases} \dfrac{dN(t)}{dt} = \dfrac{\rho(t) - \beta_{eff}(t)}{\Lambda(t)} N(t) + \sum_{i=1}^{N} \lambda_i C_i(t) + Q(t) \\ \dfrac{dC_i(t)}{dt} = \dfrac{\beta_i(t)}{\Lambda(t)} N(t) - \lambda_i C_i(t); i = 1,\ldots,n \end{cases}$$

(6.2)

$N(t)$ е интегралният неутронен поток или пълния брой неутрони в реактора, за даден момент от време t . Прието е да се работи с 6 групи ядра-предшественици на закъсняващи неутрони. Параметрите на кинетиката са:

- реактивността $\rho(t)$
- ефективният добив на ядра-предшественици от i-ти вид $\beta_i(t)$, където:

$$\beta_{eff}(t) \equiv \sum_{i=1}^{N} \beta_i(t); \text{ i=(1,2,...6)}$$

- ефективното време на генерация на едно поколение мигновени неутрони $\Lambda(t)$
- ефективният независим източник на неутрони в реактора $Q(t)$;
- ефективната концентрация на ядра-предшественици от i-ти вид $C_i(t)$

Обърнатото решение на уравненията на кинетиката (ОРУК) се получава, когато ((6.2) се решат спрямо ρ при известни $N(t)$ и останали параметри на кинетиката. За практическо извеждане на обърнатото решение се приема, че β_i и Λ не се променят по време на преходния процес [15].

За решение на системата може да се получи следният израз:

$$\frac{\rho(t)}{\beta_{eff}} = \frac{\Lambda}{\beta_{eff} I(t)} \frac{dI(t)}{dt} + 1 - \frac{1}{I(t)} \sum_{i=1}^{6} \alpha_i \lambda_i \int_{-\infty}^{t} dt' I(t') \exp\left[-\lambda_i (t-t')\right] - \frac{\Lambda Q(t)}{\beta_{eff} I(t)}$$

(6.3)

Изразът е удобен, защото не е нужно познаване на абсолютните добиви на ядрата-предшественици на закъсняващи неутрони β_i, а само относителните $\alpha_i = \beta_i / \beta_{eff}$, които зависят по-слабо от нуклидния състав на горивото [15].

При анализ на интеграла по времето отдясно на уравнението се установява, че зависимостта на $C_i(t)$ от $I(t)$ се нулира през период от 200-300 секунди [5] [15]. За коректното измерване на реактивността при преходен процес е необходимо реактиметърът да бъде пуснат поне 200-300 s преди началото на процеса, за да се минимизира влиянието на началните условия, тъй като реактивността се пресмята чрез отчитане на приноса на закъсняващите неутрони. Ако приемем, че процесът започва в момента t_0, то моментът t= 300 s е практически равен на -∞. За 300 s ще изминат поне 3 времена на живот на най-дългоживущата група закъсняващи неутрони [15].

Реактиметрите изчисляват реактивността по (6.3), използвайки обикновено стъпка на пресмятане $\Delta t = 0{,}1$ секунди, допускайки че , показанията на неутронните детектори I(t) са пропорционални на пълния брой неутрони в реактора: $I(t) = aN(t)$. В нашия случай, изходният токов сигнал (пропорционален на плътността на неутронния поток) от трите канала на АКНП първи комплект получени чрез външнозонни детектори, служи за входен сигнал в АКР с цел изчисляване на реактивността. Отчитайки пространствените ефекти в активната зона, коефициентът на пропорционалност α трябва да се оцени в зависимост от характеристиките на детекторите и конкретното състояние на активната зона [15].

Съществено е мястото на детекторите да е такова, че да осигурява усредняване на неутронния поток от по-голяма част от зоната, за да се избегнат локални ефекти. Резултатите са по-надеждни, ако се използват няколко детектора, разположени несиметрично около зоната [5].

Основните фактори, които внасят неопределеност при пресмятане на реактивността са:

- Нивото на неутронния поток при подкритичен реактор се определя предимно от независимия неутронен източник (ОЯГ е източник на неутрони от порядъка на 10^{10} неутрона на секунда). Стойността на този източник е заложена в програмата за пресмятане на АКР и неточното и определяне води до високи отклонения от реалната стойност на реактивността. В членът за независимият източник от (6.3) се вижда, че отклонения в оценката на β_{eff} и Λ внасят допълнителна неопределеност в този член [15].
- В практиката често се пренебрегва члена $\frac{\Lambda}{\beta_{eff} I(t)} \frac{dI(t)}{dt}$, внасящ най-голямо отклонение в стойността на реактивността при падане на аварийната защита, достигащо до 8-9% при първите няколко стъпки на пресмятане със стъпка 0,1 секунди [15].
- Неопределеност в константите на кинетиката λ_i β_i , β_{eff} , които зависят от нуклидния състав на горивото. В паметта на АКР са предвидени набори от константи, които могат да се избират, точния подбор на които би отразила по-точно изгарянето на горивото.
- Фоновият ток на камерите: висок фонов ток служи като постоянна съставна и може да доведе до съществени разлики в измерените и реалните ефекти на реактивност [15].
- Пространствени ефекти: При преходни процеси на въвеждане на концентрирани поглътители следва промяна на формата на неутронния поток в зоната, а оттам и преразпределение на загубите, които се регистрират от външнозонните камери. Тези ефекти водят до промяна на коефициента на пропорционалност между токът на камерите и неутронната мощност. Трябва да се отчитат и локални пространствени ефекти. Движение на един ОР СУЗ близо до периферията би се регистрирал успешно от близък блок за детектиране на АКР и е възможно да не се регистрира въобще от другите камери, нещо което се наблюдава при падане на максимално ефективният клъстър по време на пусково-физични експерименти [15].

7 МКН (минимално контролируемо ниво на мощност).

7.1.1 Цели и задачи на изпитанието

Целта на изпитанието е първоначално извеждане на РУ в критично състояние след ПГР и стаблизиране на неутронната мощността на ниво от 10^{-5} до 10^{-3} % от номиналната по показанията на апаратурата за контрол на неутронния поток (АКНП) [8]. Процесът представлява плавно въвеждане на положителна реактивност, за недопускане на пускова авария, до достигане на критично състояние. За контрол над физико-технологичните процеси по време на изпълнение на програмата се използват АКНП, АКР, показанията за концентрацията на борна киселина (в реактора, КО и ТК10В01) от автоматичен и ръчен анализ, дебитомери и др.

Изходното състояние на РУ трябва да отговаря на набор от параметри [8]:

- Температура на топлоносителя в първи контур: 270 до 280 градуса Целзий
- Налягане на топлоносителя в първи контур: 158,5 до 161,5 кгс/см^2
- Ниво в КО: 5950 до 6250 мм
- Дебит на система ТК :20 до 25 м^3/ч
- Налягане в парогенераторите: 61 до 63кгс/см^2
- Ниво в парогенераторите:235 до 240 см

7.1.2 Основни технологични процеси по време на излизане на РУ на МКН на мощност

Преди започване на същинската част от работната програма се прави проверка на готовността на система TV, съгласно програмата за пуск на блока след ПГР, което осигурява надежден пробоотбор и оценка на концентрацията на Н3ВО3 в реактора, КО и ТК10В01. Друго важно изискване е калибриране на автоматичните боромери TV30, 40, 50, намиращи се на същите пробоотборни линии, осигуряващи оперативен контрол на концентрацията на борна киселина в реално време.

Основните технологични процеси, които се извършват съгласно работната програма са следните: вдигане на първа до девета група на ОР СУЗ в полуавтоматичен режим (на стъпки от 350 мм), вдигане на десета група до 40% на стъпки от 350мм, включване на филтри ТЕ20(10)N02,03 и тяхното насищане. Програмата продължава с отворен водообмен на първи контур с чист кондензат с разход около 40м^3/ч през ТК70В01 и изключен ТК10В01 от смукателния колектор на ТК21,22,23D01,02. След достигане на борна концентрация с 2 г/кг над изчислената критична независимо от вида анализ, отвореният обмен се прекратява. Помпи ТК се подключват към ТК10В01 и се започва хомогенизация на топлоносителя в обема на първи контур, ТК10В01 и КО, докато не се стигне изравняване на концентрацията на борна киселина в рамките на 0,3г/кг. Концентрацията на борна киселина в КО е по-висока от тази в първи контур, а тази в ТК10В01 е по-ниска, което води до два източника на промяна на борната концентрация в контура с противоположно влияние. Крайният резултат на хомогенизацията е намаляване на борната киселина в реактора, вкарвайки положителна реактивност. След първата хомогенизация следва отворен водообмен с дебит около 20м^3/ч,

последван от втора хомогенизация при достигане на концентрация в контура с 1 г/кг над критичната, и нов период на отворен водообмен с дебит около 10м^3/ч. Ако след удължена първа хомогенизация се достигне пусковият диапазон (1 г/кг над критичната концентрация) или близо до него, етапът на водообмен с 20м/ч се пропуска и се минава директно на 10м^3. Последният процес на водообмен продължава до достигане на неутронна мощност около 2.10^{-6} %, поне по два канала на АКНП (превключвайки помпи ТК към ТК10В01), междувременно извеждайки ЙК на системата за контрол на презарядката (СКП) в крайно долно положение. Входните сигнали на АКР се превключват от СКП към АКНП.

При достигане на стабилен положителен период от 400-200 секунди (надкритичност 0,03-0,06 βeff) и неутронна мощност по АКНП в интервала 10^{-5} до 10^{-3} % от номиналната мощност, се извършва движение на контролиращата група до достигане на постоянна неутронна мощност и поява на период 999сек. Стойността на основните параметри се записва и МКН се фиксира документално.

След фиксиране на МКН се извършва проверка чрез вдигане на регулиращата група до поява на малка надркитичност (период от 100 до 300 сек), след което чрез снижаване на групата се стига отново до критично състояние. Същата процедура се повтаря в обратната посока чрез вкарване на отрицателна реактивност чрез спускане на регулиращата група.

Работната програма завършва чрез вземане на 3 проби за ръчен анализ на концентрацията борната киселина в топлоносителя от реактора. Средната стойност от трите проби се сравнява с разчетната критична стойност и програмата се смята за успешно завършена, ако средната стойност не се различава с повече от 0,5г/кг от разчетната.

7.2 Обработка и анализ на данните за борната концентрация, неутронната мощност и реактивността по време на водообмен с цел достигане на МКН за 24-та кампания, 6-ти блок на „АЕЦ Колоздуй“ ЕАД.

В конкретната кампания на „АЕЦ Козлодуй“ ЕАД е изведена РУ в критично състояние на МКН след презарядка на гориво в рамките на 12 часа , считайки началото на отворения водообмен за начална точка на времевия интервал, за целите на анализ на данните. Началната концентрация на борната киселина е оценена чрез ръчно титруване на 18,54 г/кг [16]. Отвореният водообмен с дебит 40м^3/ч продължава около 4 часа, достигайки до борна концентрация от 12,36 г/кг в реактора. Последвалият дълъг период на хомогенизация продължава около 4,5 часа, достигайки борна концентрация от 11,74г/кг. Поради текущата стойност на концентрацията на борна киселина след хомогенизацията, попадаща близо до пусковия диапазон, не се налага отворен водообмен с 20м^3/ч [16]. След хомогенизацията е преминато директно към отворен водообмен с ЧК с дебит 10м^3/ч, продължаващ 3 часа. Един час след края на отворения водообмен с дебит 10м^3/ч, е фиксиран МКН при концентрация на борна киселина от 10,12г/кг в реактора, което съвпада с разчетната стойност от 10,60 г/кг и неопределеност от 0,5 г/кг [16].

Извършена е обработка на данните за неутронната мощност и реактивностите по три канала, пресметнати от АКР, записани през 1 секунда по време на излизане в критично състояние на МКН. АКР пресмята неутронната мощност на базата на входящ честотен сигнал от трите канала АКНП първи комплект или трите канала СКП първи комплект. По нарастването/намаляването на този сигнал във времето, АКР пресмята трите реактивности. Входният сигнал се получава от СКП до свалянето на камерите на СКП в долно положение и превключване на АКР към АКНП при неутронна мощност около 1.10^{-6} % от номиналната мощност.

7.2.1 Анализ на експлоатационните данни за пресметнатата неутронна мощност и реактивност от АКР

Неутронната мощност по време на водообмен пресметната от АКР е функция на борната концентрация в активната зона и поведението и може да се раздели на три участъка: интервал на линейно нарастване на неутронния поток по време на водообмен, скокообразна промяна на неутронния поток при превключване на входния сигнал от СКП към АКНП и експоненциално нарастване на неутронния поток при достигане на надкритичност (Фигура 7.1)

При превключване на входния сигнал на АКР от СКП към АКНП, се виждат значими разлики в показанията на неутронната мощност преди и след смяната на източника на входния сигнал. Освен това, липсват показания за мощността и реактивността за период от около 15 мин. Показанията на АКР за реактивността при изключен входен сигнал спадат до –100 β_{eff} , което налага изчакване на 200-300 секунди за изключване влиянието на фалшивите силно отрицателни стойности след подаване на входен сигнал от АКНП.

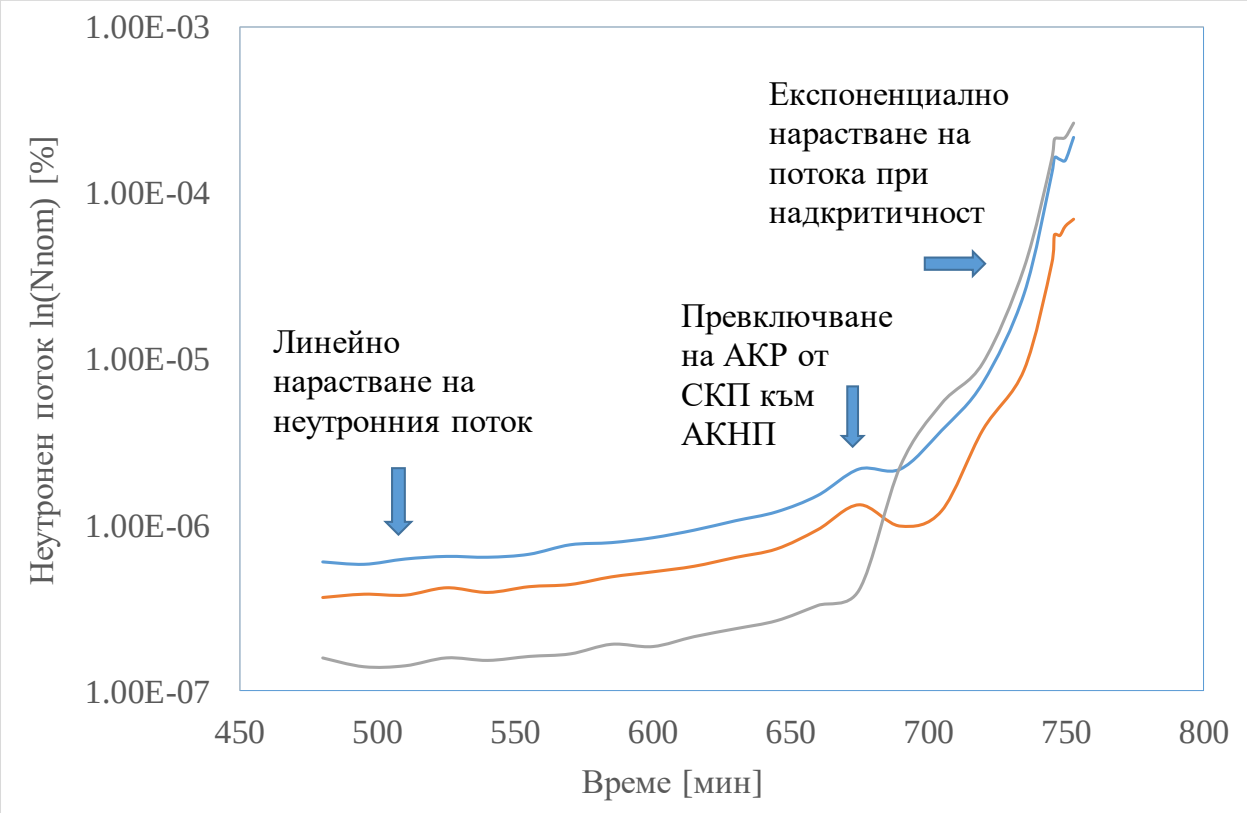
Непренебрежимите разлики в неутронната мощност след промяната на входния сигнал най-вероятно се дължат на пространствени ефекти в активната зона, въпреки силната еднородност и симетрия на зареждане. При разглеждане на малък брой, най-близки топлоотделящи касети до детекторните блокове, се вижда че те се различават силно по средно обогатяване и дълбочина на изгаряне, което би довело до различен поток неутрони, достигащи до детекторите. При разглеждане на голям брой касети, разликите в средните дълбочини на изгаряне и обогатяването са твърде малки. Немалкият брой свежи силно обогатени касети в близост до детекторите са силен потенциален източник на неутрони, който би бил толкова по-силен, колкото е по-силен независимият източник на неутрони, тоест отработеното ядрено гориво. При сравнително еднакъв брой свежи и еднакви по обогатяване касети в близост до камерите, неутронния поток стигащ до детекторите би зависил силно от средната дълбочина на изгаряне (големината на независимия неутронен източник) на близките касети. Мощността на независимия източник е пропорционална на дълбочината на изгаряне на степен 4,5.

За изследване на тези пространствени ефекти бяха разработени и изпробвани няколко прости емпирични модела, взимащи под внимание конкретното зареждане на активната зона. В тази диплома ще бъде представен и използван най-ефективният.

7.2.1.1 Емпиричен модел за изследване на пространствени ефекти и влиянието им върху показанията за реактивност и неутронна мощност по АКР.

За разстоянието, на което „виждат“ детекторите е прието разстоянието от детекторния блок на третия канал на АКНП до максимално ефективния клъстър за съответното зареждане на зоната. Това разстояние е избрано, на базата на задоволителното влияние върху показанието за реактивността при спускането на клъстера след АЗ по време на пусковите-физични експерименти.

При приети равни на брой свежи еднакво обогатени касети около камерите, е пресметната средната дълбочина на изгаряне на касетите, които са в „обсега“ на детекторите. Разположението на камерите както и разположението на касетите в зоната са представени на цветна картограма, която показва броя на кампаниите на всяка касета в зоната (Приложение 3). Дълбочината на изгаряне на касетите е пряко пропорционална на времето им прекарано в зоната.

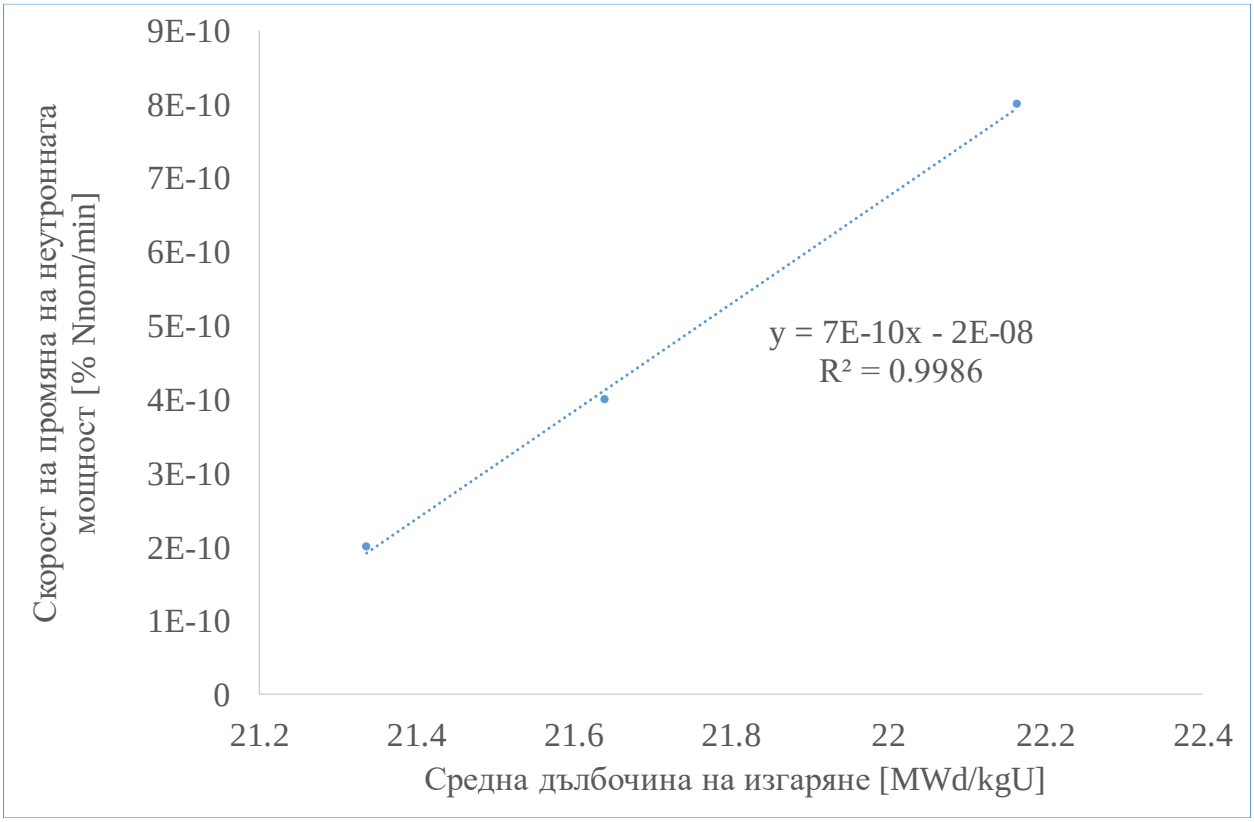


Фигура 7.1 Неутронната мощност в логаритмичен мащаб по три канала,пресметната от АКР по време на водообмен до МКН на мощност.

При построяване на графика на неутронния поток пресметнат от АКР , с входен сигнал от СКП, по време на водообмен с дебит 40м^3/час като функция на времето, лесно можем да възстановим скоростта на нарастване на неутронния поток $\partial N/\partial t$ (наклонът на правата) с линейна регресия по метод на най-малките квадрати с висока точност. Построявайки зависимостта на трите различни скорости на нарастване на неутронния поток

∂N/∂t от средната дълбочина на изгаряне която „виждат“ детекторите според приетия модел, ясно се вижда, че се получава почти идеална линейна зависимост (*Фигура 7.2*).

Същата линейна зависимост се вижда и при водообмен с 10м3/час, преди нарастването на неутронния поток да започне да се отклонява от линейното. Задоволителни линейни зависимости се наблюдават при построяване на ∂N/∂H3BO3 като функция на средната дълбочина на изгаряне, както и за три случайни моменти стойности на неутронната мощност като функция на дълбочината на изгаряне. Доказваме, че дори с този прост модел, стойността на неутронната мощност пресметната от камерите е силно линейнозависима от броя свежи касети около тях и дълбочината на изгаряне на близките касети.

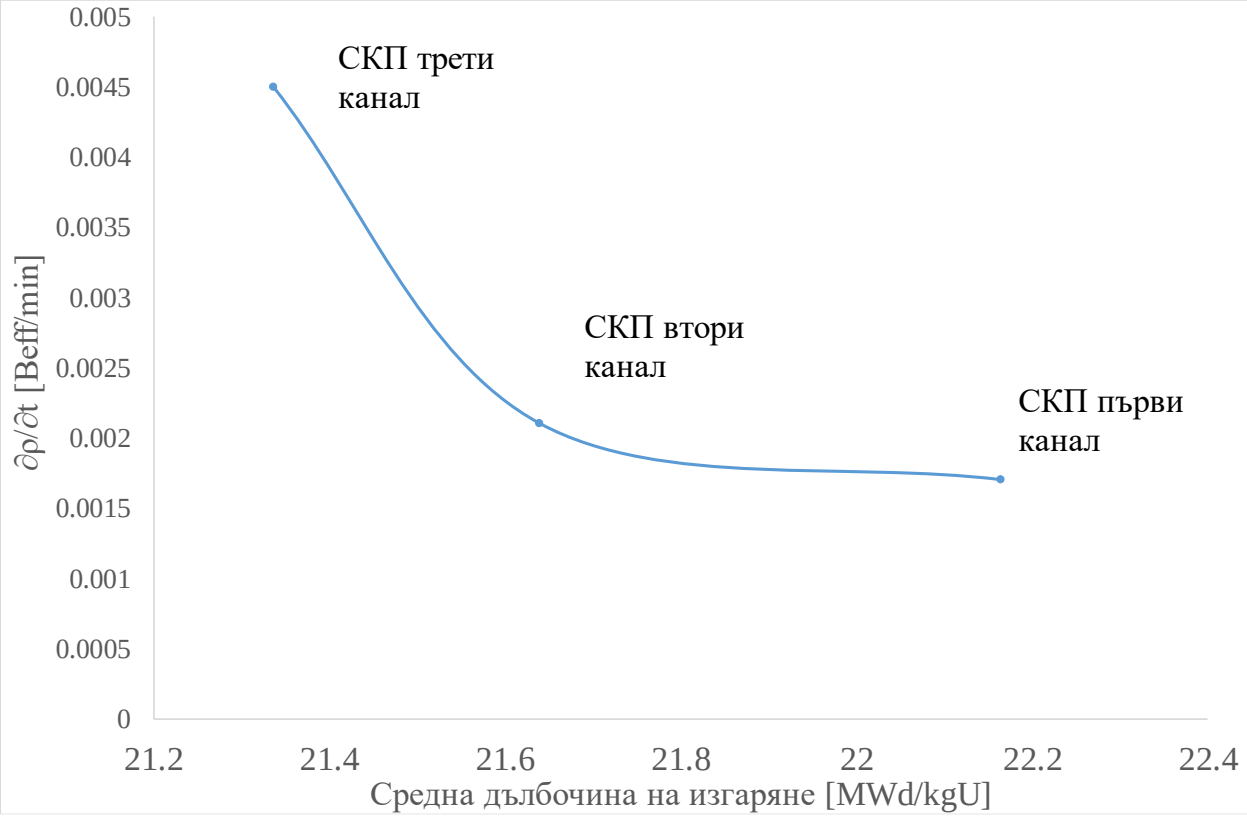


Фигура 7.2 Скорост на нарастване на неутронния поток като функция на средната дълбочина на изгаряне, която "виждат" детекторите на СКП при водообмен с дебит 40м3/час

Интерес представлява промяната на неутронната мощност по трите канала при промяната на входните сигнали на АКР от СКП към АКНП. Вижда се, че третият канал на неутронна мощност се повишава с около 10 пъти, а вторият и първият търпят леки промени. Фигура 7.1). Емпиричният модел добре описва въпросния скок в мощностите качествено и донякъде количествено чрез зависимостта на моментната неутронна мощност като функция на средната дълбочина на изгаряне около камерите на АКНП, както и поведението на неутронната мощност в по-късен момент след скока. Резултатите са представени в Приложение 4.

При анализ на показанията за реактивност по време на водообмен с 40 м^3/час и входен сигнал от СКП се вижда, че третият канал на АКР се държи коренно различно от другите два. Стойностите на реактивността, както и скоростта на нарастването $\partial\rho/\partial t$ се различават значимо от другите два, които изглежда запазват същата линейна зависимост от средната дълбочина на изгаряне около камерите на СКП (Фигура 7.3). По време на времевия интервал на отворен водообмен с 10м^3/час, зависимостта на стойностите на моментните реактивности по трите канала и $\partial\rho/\partial t$ от средната дълбочина на изгаряне около камерите запазва качествено вида си, точно като на Фигура 7.3, само $\partial\rho/\partial t$ са по-ниски, както се и очаква. Най-вероятната причина за различното поведение на третия канал на АКР от другите два е различна зададена по стойност мощност на независимия неутронен източник и/или различни константи на кинетиката.

С цел сравнение на стойностите на реактивността бяха направени сметки с програмен комплекс КАСКАД. Резултатите за реактивността по време на водообмен с 10 и 40м^3/час са представени в Приложение 5. Вижда се, че моментните стойности на реактивността, както и коефициентът $\partial\rho/\partial$НЗВО3 са много различни от оценките на КАСКАД. Прави впечатление, че $\partial\rho/\partial$НЗВО3 и за трите канала се увеличава с намаляване на борната концентрация, което отговаря на реалното повишаване на ефективността на борната киселина. Третият канал се доближава повече до оценките на КАСКАД, но и трите канала следва да се настроят чрез промяна на стойността на независимия неутронен източник и константи на кинетиката, за да покажат резултатите съизмерими с разчетните.



Фигура 7.3 Скорост на нарастване на реактивността като функция на средната дълбочина на изгаряне, която "виждат" детекторите на СКП при водообмен с дебит 40м3/час

След 600-та минута на водообмен трите неутронни мощности оценени от АКР започват да проявяват различно от линейното поведение, все по-наподобяващо много бавно нарастваща експонента, което се проявява първо за канала с най-висока неутронна мощност. Това явление съвпада с концентрации на борната киселина в първи контур, близки до разчетната критична концентрация. Този фактор, както и смяната на разположението и видът на детекторите, водещо до рязки промени на показанията на неутронната мощност на АКР, затрудняват анализа на данните и понижават точността на изготвения емпиричен модел.

За по-точни оценки са нужни данни от АКНП, където не се наблюдават резки промени на неутронния поток в следствие от смяна на детекторите, както и загуба на данни по време на превключването им. Нужен е и модел, отчитащ нелинейното поведение на неутронната мощност след определен момент, както и разстоянието на отработеното ядрено гориво от свежите касети в близост до камерите.

Чрез данните от автоматичния и ръчен борен анализ, както и стойностите на реактивността като функция на времето и борната киселина е възможно да се направят оценки за критичната борна концентрация.

7.2.2 Анализ на експлоатационните данни за концентрацията на борна киселина в топлоносителя на първи контур

Една от най-значимите величини, оказваща в голяма степен действието на персонала по време на водообмен с цел излизане на МКН е концентрацията на борна киселина в първи контур. Оценката на тази величина се извършва автоматизирано и непрекъснато чрез две пробоотборни линии на технологичната система TV, чрез боромери, които се тарират преди и по време на водообмен при нужда. Неопределеността на измерването на боромерите е ±2,5% при правилна тарировка.

Освен в YC, концентрацията на борната киселина се определя автоматично и ръчно в КО, а ръчно и в ТК10В01.

Паралелно, борната концентрация в първи контур се оценява чрез пробоотбор и ръчен лабораторен анализ чрез титруване по два технологични канала (Фигура 7.4). За конкретната кампания, показанията на двата съвпадат в рамките на инструменталната неопределеност. Концентрацията на борна киселина чрез ръчен анализ се пресмята по формулата [17]:

$$C = \frac{a.K.N.6{,}18}{V}\ [\frac{g}{l}]$$

(7.1)

където:

a- изразходваният обем 0,1H NaOH при титруването

N- нормалност на NaOH

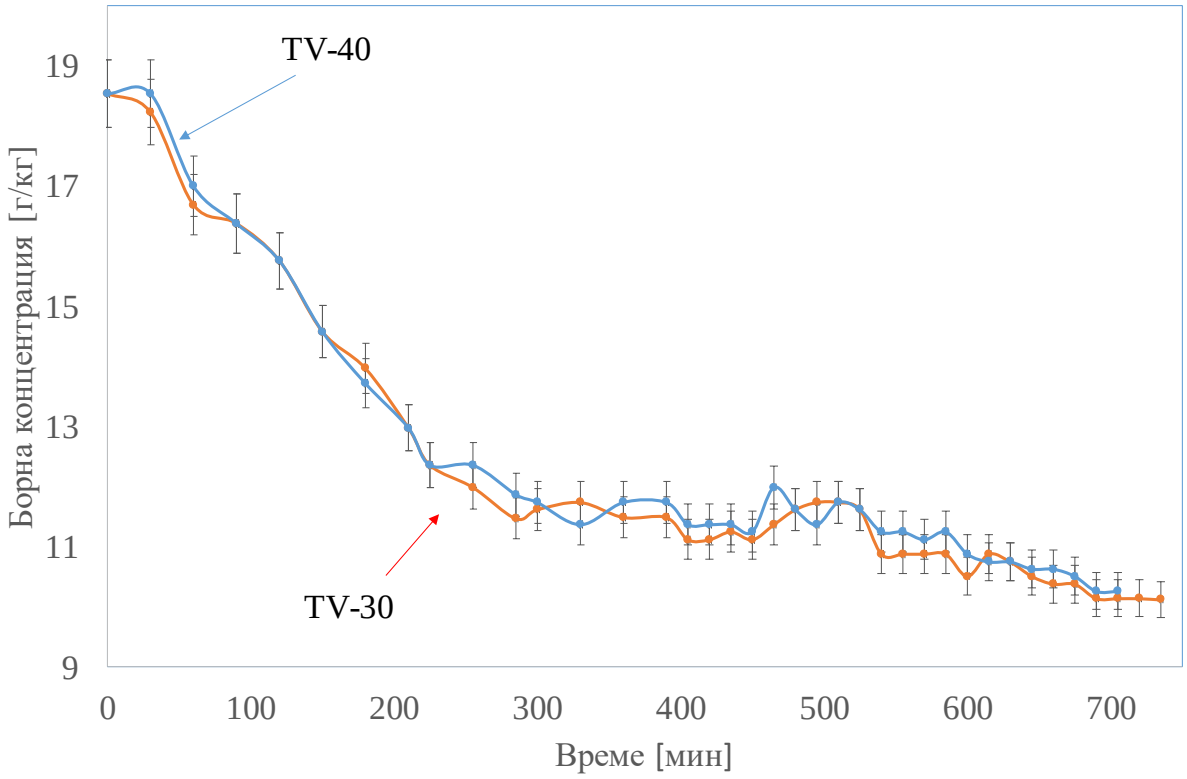
K- поправъчен коефициент за точна нормалност на титранта

61,8 – еквивалентната маса на борната киселина

V-обем на пробата

В лабораторията има наличен и автоматичен титратор, но той не се използва по време на водообмен за МКН на РУ. Неопределеността и при двата метода на титруване зависи най-вече от количеството NaOH, което се добавя към пробата, а то зависи от цветоусещането на лаборанта. С нарастване на добавената NaOH над допустимата се повишава оценената концентрация на борна киселина. Според [17] , неопределеността на оценката за интересуващия ни диапазон на борна киселина варира между 1÷3%. Консервативният избор е 3%, което за концентрации около 10г/кг е равно на 0,3г/кг, съвпадащо с неопределеността на оценяване на критичната борна концентрация за МКН, определена в албум НФХ [18].

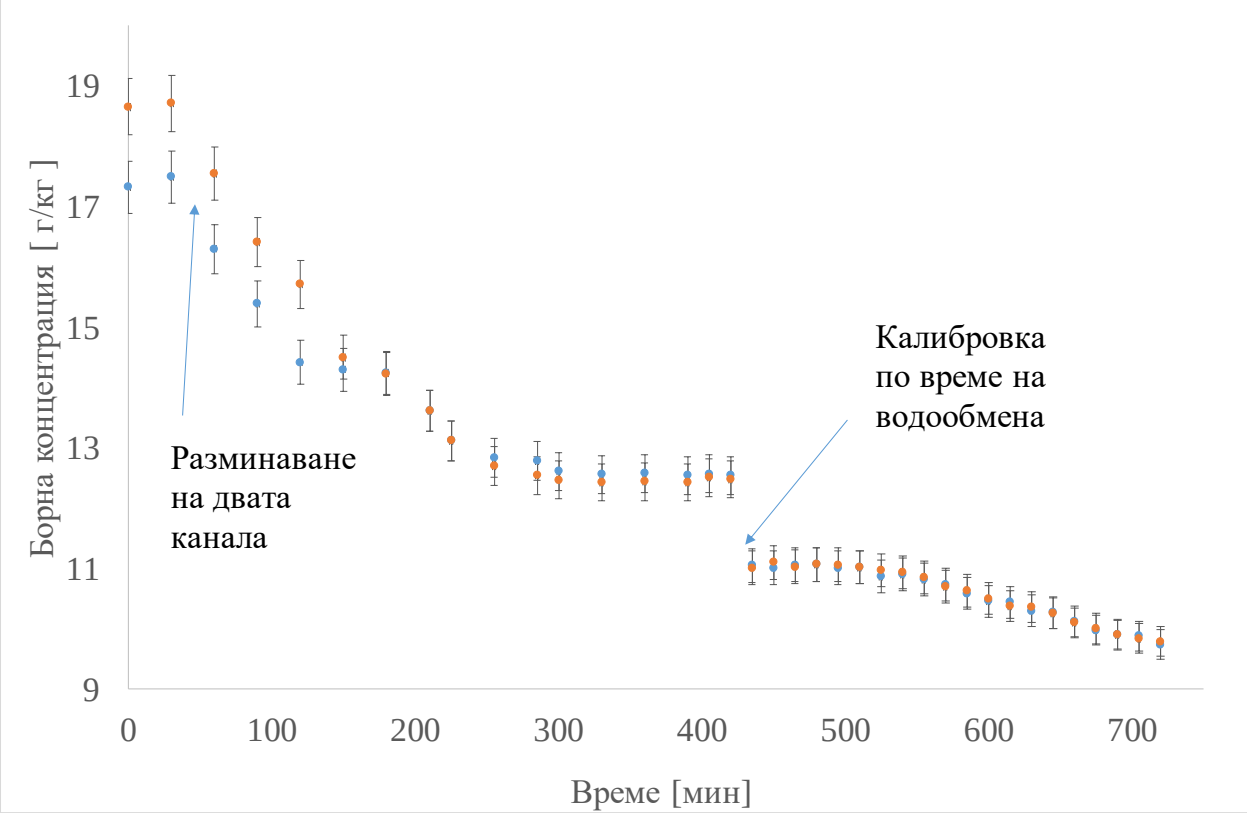
Оценката за критичната борна концентрация по време на водообмен и особено по време на фиксиране на МКН е ненадеждна по показанията на автоматичните боромери, защото показанията им понякога силно се различават между двата автоматични боромера (Фигура 7.5), както и спрямо ръчния анализ . При прецизна калибровка, силнолинейното поведение на автоматичните боромери и избягването на повтарящи се стойности (като при ръчния анализ) са подходящи за анализ на данни.



Фигура 7.4 Сравнение на ръчно-оценените борни концентрации в първи контур от TV30.40 по време на водообмен за излизане на МКН на мощност

От експлоатационните данни чрез линейна регресия по метода на най-малките квадрати са пресметнати ∂НЗВО3/∂t и техните неопределености за интервалите от време на водообмен с 40м^3/ч (Таблица 7.1) и 10м^3/час (Таблица 7.2) и сравнени с разчетните такива от [8].

Табулирани са данни за водообмен по модела за водообмен разработен в [19] и е изчислена ∂НЗВО3/∂t с цел сравнение с разчетните и експериментално оценените такива. За пресмятане на ∂НЗВО3/∂t по модела от [19] са използвани два гранични случая за обема-обема на РУ и обема на РУ събран с обема на КО. Резултатите са представени в Таблица 7.1 и Таблица 7.2. Сравнение на хода на концентрацията на борна киселина като функция на времето оценена чрез ръчен анализ по време на водообмен и табулираните данни за двата гранични случая на модела се виждат в Приложение 6 .Разминаванията на модела с реалните експлоатационни данни се дължи на неопределеност в ефективно участващите обеми при водообмен, както и неопределености в дебита на водообмен.



Фигура 7.5 Сравнение на автоматично оценените борни концентрации от TV30,40

Таблица 7.1 Резултати за ∂H3BO3/∂t от фитиране на експлоатационните данни чрез линейна регресия за водообмен с 40м^3/час

Разчетно ∂H3BO3/∂t [g/kg.min], F= 40m^3/h	Експериментално ∂H3BO3/∂t [g/kg.min], F= 40m^3/h	Неопределеност на експериментално ∂H3BO3/∂t
~0,0300 [g/kg.min]	TV30 ръчен анализ 0,0274 [g/kg.min]	± 0,0028(CI=95%) [g/kg.min]
~0,0300 [g/kg.min]	TV40 ръчен анализ 0,0286 [g/kg.min]	± 0,0028(CI=95%) [g/kg.min]
~0,0300 [g/kg.min]	TV30 авт. анализ 0,0193 [g/kg.min]	± 0,0043(CI=95%) [g/kg.min]
~0,0300 [g/kg.min]	TV40 авт. анализ 0,0264 [g/kg.min]	± 0,0035(CI=95%) [g/kg.min]
~0,0300 [g/kg.min]	Осреднено от ръчен анализ: 0,0280 [g/kg.min]	± 0,0027(CI=95%) [g/kg.min]
~0,0300 [g/kg.min]	Осреднено от автоматичен анализ: 0,0229 [g/kg.min]	± 0,0036(CI=95%) [g/kg.min]
~0,0300 [g/kg.min]	По модел за водообмен в два гранични случая: 0.0306 [g/kg.min] 0.0275[g/kg.min]	± 0,00066(CI=95%) ± 0,00055(CI=95%)

Таблица 7.2Резултати за ∂H3BO3/∂t от филтриране на експлоатационните данни чрез линейна регресия за водообмен с 10м^3/час

Разчетно ∂H3BO3/∂t [g/kg.min], F= 10m^3/h	Експериментално ∂H3BO3/∂t [g/kg.min], F= 10m^3/h	Неопределеност на експериментално ∂H3BO3/∂t
~0,0066 [g/kg.min]	TV30 ръчен анализ 0,0069 [g/kg.min]	± 0,0028(CI=95%) [g/kg.min]
~0,0066 [g/kg.min]	TV40 ръчен анализ 0,0072 [g/kg.min]	± 0,0014(CI=95%) [g/kg.min]
~0,0066 [g/kg.min]	TV30 авт. анализ 0,0061 [g/kg.min]	± 0,0006 (CI=95%) [g/kg.min]
~0,0066 [g/kg.min]	TV40 авт. анализ 0,0064 [g/kg.min]	± 0,0005(CI=95%) [g/kg.min]
~0,0066 [g/kg.min]	Осреднено от ръчен анализ: 0,0071 [g/kg.min]	±0,0019 (CI=95%) [g/kg.min]
~0,0066 [g/kg.min]	Осреднено от автоматичен анализ: 0,0062 [g/kg.min]	±0.0005 (CI=95%) [g/kg.min]
~0,0066 [g/kg.min]	По модел за водообмен 0,00584[g/kg.min]	±0,00003(CI=95%) [g/kg.min]

~0,0066 [g/kg.min]	По модел за водообмен 0,00515[g/kg.min]	±0.00002(CI=95%) [g/kg.min]

При фиксиране на МКН се взимат 3 последователни ръчни проби през 5 мин и се оценява концентрацията на борна киселина в топлоносителя. Оценените стойности чрез ръчно титруване в случая са :10,07 ; 10,14 ; 10,14 г/кг. При предположение ,че измерените величини и средната квадратична грешка на среднения резултат са случайни величини, отчитайки броя на измерванията и инструменталната грешка, за краен резултат и неопределеност в доверителен интервал 95% се получава:

- 10,12± 0,32 г/кг (CI= 95%, инструментална грешка = 3%)
- 10,12±0,14г/кг (CI= 95%, инструментална грешка = 1%)

Чрез построяване на показанията на автоматичните боромери като функция от времето, както и реактивността от трите канала на АКР като функция на борната концентрация е направена оценка за критичната борна концентрация на МКН на мощност. Всичките резултати за оценките на критичната борна концентрация са представени в (Таблица 7.3).

Таблица 7.3 Оценки за критичната борна концентрация

Разчетна критична борна концентрация [г/кг]	Оценена критична концентрация по показания на АКР [г/кг]	Критична концентрация чрез ръчен анализ [г/кг]	Критична концентрация според данните на авт .боромерите за фиксирания час на МКН
10,60		10,12	9,80
Неопределеност спямо албум НФХ : 0,3 г/кг ; 0,5г/кг спрямо работната програма)	АКР-1 : 9,87 АКР-2: 9,76 АКР-3:9,92	Неопределеност : ± 0,32	Неопределеност: ±0,24г/кг

7.3 Симулиране на хода на реактивността по време на водообмен за МКН на мощност чрез Монте Карло симулации на програма Serpent

При непроменящи се други условия в активната зона по време на водообмен, реактивността е линейно-изменяща се функция на борната киселина, която нараства по време на отворения водообмен с намаляването на борната киселина. За оценяване на критичната борна концентрация за МКН на мощност преди водообмен може да се пресметне ходът на реактивността като функция на борната киселина при конкретно зареждане на зоната и равни други условия чрез детерминистични транспортни кодове като споменатия вече КАСКАД. По стойността за критичната борна концентранция и модел за

водообмен на топлоносителя се изготвя график на водообмен, който се включва в работната програма за извеждане на реактора на МКН на мощност.

Чрез описаните вече модели на топлоотделящи касети и поставяне на гранични условия са изготвени две безкрайни решетки от еднотипни касети, имитиращи активна зона, без загуба на неутрони поради загуби. При пресмятане на реактивността като функция на борната киселина при плътности и температури близки до тези в истинската активна зона се оказва, че тази конфигурация е силно надкритична за работните концентрации на борна киселина по време на водообмен и става критична при концентрации около 26г/кг за касета с обогатяване 4,62%.

За да може да се постигне съпоставима и реалистична оценка за критичната борна концентрация бяха приложени следните пресмятания за двата вида касети поотделно:

- Пресмятане на критичността на касетата с периодични гранични условия и определяне на надкритичността на конфигурацията.
- Редуциране на забавителя в касетата (водорода) за всяка борна концентрация за постигане на съпоставими свойства на размножаване на симулираната зона и реалната, компенсирайки излишната реактивност
- Сметките се повтарят за двете касети, варирайки борната киселина (симулиране на водообмен) до достигане на критичност
- Намира се критичната борна концентрация и се сравнява с реалната при постигнати съпоставими свойства на размножение

Резултатите от симулациите за двете надкритични конфигурации и двете конфигурации с намален забавител са представени графично в Приложение 8.

От графиките чрез линейна регресия по метод на най-малките квадрати е определена критичната борна киселина за двете конфигурации с редуциран забавител с неопределеност в 95% интервал на достоверност:

- За касета с 4,62 % средно обогатяване : 10,16 ± 0,26 г/кг (CI = 95%)
- За касета с 4,00 % средно обогатяване: 10,28 ± 0,18 г/кг (CI = 95%)

Освен достатъчно точна оценка за критичната борна концентрация, моделът на касета с 4,62% средно обогатяване и редуциран забавител дава и добра оценка за хода на реактивността като функция на борната киселина. Сравнение с пресмятания от Каскад е демонстрирано в Приложение 9.

7.4 Анализ на данните от изпитанието за оценка на ефективността на аварийната защита. Монте Карло симулация на падане на АЗ

Поведението на реактивността по време на падане на аварийната защита е рязък спад до дълбока подкритичност, илюстрирана в Приложение 11. Отчитайки симетричността на аварийната защита се очаква регистрираните отрицателни реактивности по трите канала на АКР да са близки. Скоростни въвеждания на силни поглътители нарушават линейната пропорционалност на неутронния поток в активната зона и утечките, стигащи до детектиращите блокове. В конкретната кампания, аварийната защита е тествана със задържане на максимално ефективният клъстер, който е в близост до третия детекторен блок на система АКНП, довеждайки до по-ниска отрицателна реактивност оценена именно

от този канал на АКР. Разликите в първите два канала са малки, сравними с инструменталната неопределеност на АКР при скоростно внасяне на високи отрицателни реактивности. Може да се заключи, че първите два канала имат еднакви настройки на независимият неутронен източник и константите на кинетиката.

Отново може да се приложи изведеният емпиричен модел, обвързващ показанията на детекторите за неутронна мощност и реактивност със средната дълбочина на изгаряне, която те „виждат“. За показанието на реактивността на третия канал АКР ще се счита реактивността внесена от АЗ събрана с реактивността от максимално ефективният клъстър, въпреки че тази оценка не е напълно реалистична. Останалите канали не регистрират промяна в реактивността при падане на МЕК, защото са физически твърде далеч. Възможни са два подхода, по показанията на неутронната мощност след падане на аз да се сметне какви би трябвало да реактивността на третия канал и оттам тя да се обвърже с дълбочината на изгаряне около детектора. Другият възможен вариант е да се приеме реактивността от АЗ+МЕК и да се опита да се възстанови неутронната мощност, която да се обвърже със средната дълбочина на изгаряне. Анализът показва, че моделът не може да обвърже реактивността на третия канал или неутронния поток със средната дълбочина на изгаряне около третия детектиращ блок за АКНП, така щото те да са в линейна зависимост с показанията на другите два детекторни блока защото и двете стойности са компрометирани от задържането на максимално ефективният клъстър и нито една от тях не може да е референтна.

Направена е и Монте Карло симулация на въведената аварийна защита. За целта е модифициран моделът за касетата с 4,62% обогатяване с редуциран забавител, като в направляващите канали са добавени ОР СУЗ и е пресметната разликата в реактивността от критично състояние до дълбоко подкритично. Резултатите от симулацията показват внасяне на отрицателна реактивност около 30 % , което е много далеч от оценените реактивности по трите канала на АКР, вариращи в рамките на 6,8 до 7,4 %. Така изготвеният модел не може да се използва за оценка на ефективността на аварийната защита.

8 Резултати

Поставените задачи на дипломната работа са завършени успешно.

Направен е анализ на експлоатационните данни, като са определени възможни източници на неопределеност в данните.

Разработен е емпиричен модел, изследващ пространствени ефекти в зоната, който обвързва средната дълбочина на изгаряне около детекторните блокове на СКП и АКНП с показанията на детекторите, показващ достатъчно точни резултати.

Разработени са два модела на топлоотделящи касети, чрез които може да се оцени критичната борна концентрация и зависимостта на реактивността от концентрацията на борна киселина с висока точност.

9 Заключение

Данните за неутронната мощност от камери АКР не са подходящи за изследване на процеси в активната зона, по-добра алтернатива е да се използват данните от АКНП. Данните за реактивност от АКР биха били по-удобни за анализи, при залагане на стойностти за независимия неутронен източник и кинетичните константи, отговарящи на активната зона, както и да са уеднаквят за всички канали на системата.

Програмата Serpent, дори с базисни нейни функции и прости модели показва задоволителни и обещаващи резултати. Моделът, симулиращ аварийната защита не е ефективен и не може да се използва за оценки.

Целите на дипломната работа са постигнати в предварително определения мащаб. Работата по тематиката ще бъде продължена и доразвита чрез създаване на по-сложни модели за Монте Карло симулации и анализ на по-голям обем данни от различни горивни кампании.

Литература

[1] Агенция за ядрено регулиране, „Безопасна експлоатация на АЕЦ,“ София, 2011.

[2] Агенция за ядрено регулиране, Наредба за осигуряване безопасността на ядрените централи, София, 2004.

[3] "https://en.wikipedia.org/wiki/Monte_Carlo_method#History," [Online].

[4] "АЕЦ Козлодуй" ЕАД, „Тема 445.05С: “Експериментално измерване на пускови неутронно-физични характеристики на активната зона на ВВЕР-1000”,“ в *СК. 445 “Пускови физични изпитания на ВВЕР-1000"*, Козлодуй, 2018.

[5] Е. Вапирев и И. Христосков, Неутронно-физични процеси при ВВЕР-440 (В-320) и ВВЕР-1000 (В-320), Козлодуй: УТЦ на "АЕЦ Козлодуй", 2000.

[6] "АЕЦ Козлодуй" ЕАД, „сравнение данните от пускови физични експерименти и неутронно-физичните пресмятания на 6 блок, 24 кампания,“ "АЕЦ Козлодуй" ЕАД, Козлодуй, 2018.

[7] "АЕЦ Козлодуй" ЕАД, „Технологичен регламент за безопасна експлоатация на блок номер 6 на АЕЦ Козлодуй с реактор ВВЕР-1000/В-320/,“ "АЕЦ Козлодуй" ЕАД, Козлодуй.

[8] "АЕЦ Козлодуй" ЕАД, „Програма за извеждане на реактора в критично състояние на минимално контролируемо ниво на мощност,след презареждане на 6 блок на "АЕЦ Козлодуй" ЕАД,2018г.,“ 2018.

[9] "АЕЦ Козлодуй" ЕАД, „Инструкция по експлоатация на АКНП,“ "АЕЦ Козлодуй" ЕАД, Козлодуй.

[10] "АЕЦ Козлодуй" ЕАД, „Инструкция по експлоатация на АКР“.

[11] „Апаратура контроля реактивности АКР-03Р.Руководство по експлуатации.РУНК.412161.001 РЕ.“.

[12] "АЕЦ Козлодуй" ЕАД, „Програма за обследване на техническото състояние на комплекс АКНП-7-02К(18.36.АСУ.НР.РП.8312/0“.

[13] "АЕЦ Козлодуй" ЕАД, „Акт за изпълнение на програма номер 18.36.АСУ.НР.АПР.626“.

[14] "АЕЦ Козлодуй" ЕАД, „Протокол номер 18.36. АСУ.ПРТ.684“.

[15] "АЕЦ Козлодуй" ЕАД, „Лекционен курс 01: "НЕУТРОННО-ФИЗИЧНИ ПРОЦЕСИ ВЪВ ВВЕР".Тема 01.12: „Обратна задача на реакторната кинетика.Реактиметър“.,“ "АЕЦ Козлодуй" ЕАД, Козлодуй.

[16] "АЕЦ Козлодуй" ЕАД, „Акт за изъплнение на програма номер 18.36.ОБ.УС.РП.8288/0,“ "АЕЦ Козлодуй" ЕАД, Козлодуй.

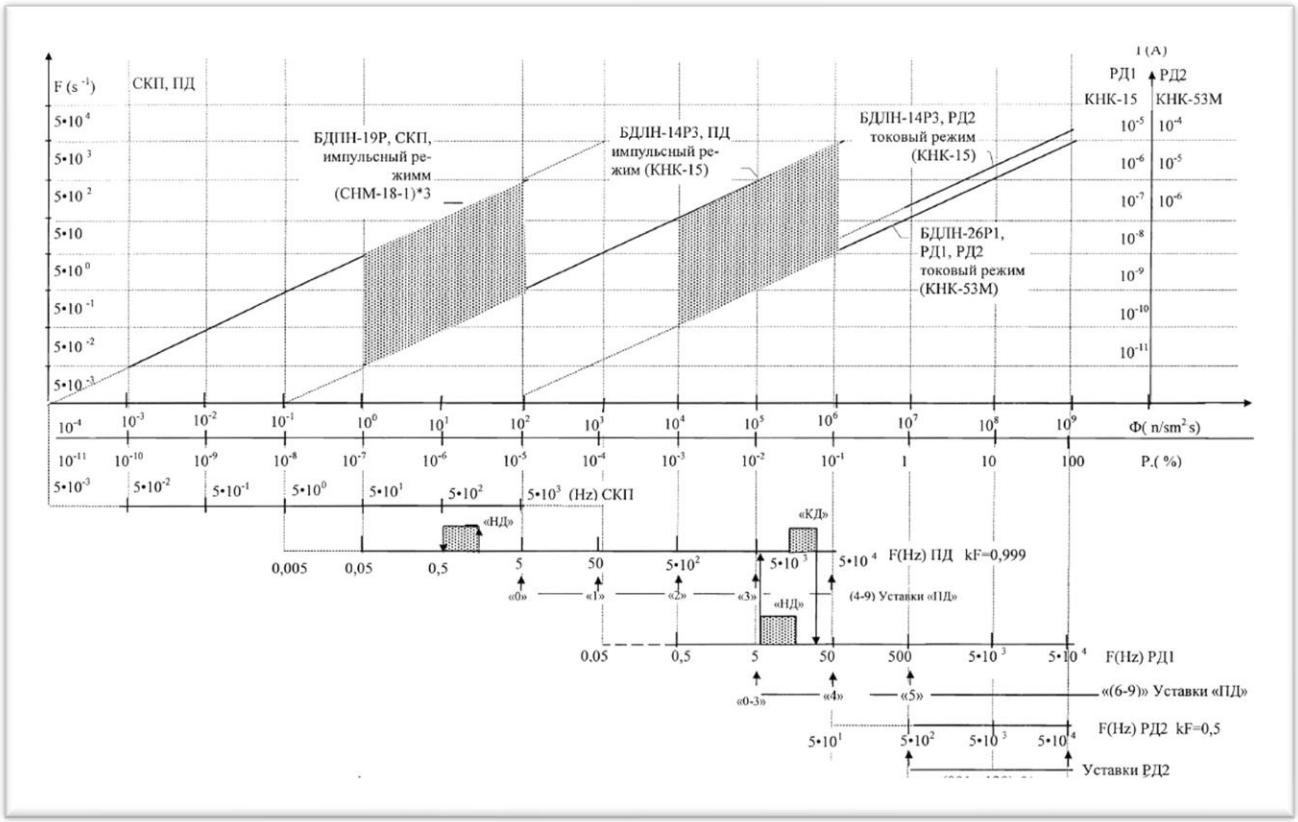
[17] "АЕЦ Козлодуй" ЕАД, „14) Сборник методики за химичен контрол на водния режим на АЕЦ с ВВЕР-1000, установки СВО и ХВО (30.ХК.00.МТ.01/5),“ Козлодуй.

[18] "АЕЦ Козлодуй" ЕАД, „Албум разчетни неутронно-физични характеристики на 24-то зареждане на реактор ВВЕР-1000 на шести блок,“ Козлодуй, 2018.

[19] Стоян Кръстев, „Дипломна работа на тема: "Модел за изменение на борната концентрация в топлоносителя на РУ ВВЕР - 1000 (В-320)",“ Козлодуй, 2010.

[20] "АЕЦ Козлодуй" ЕАД, „Курс 01 "НЕУТРОННО-ФИЗИЧНИ ПРОЦЕСИ ВЪВ ВВЕР".Тема 01.11: "Кинетика на подкритичния реактор.Физически пуск на реактора",“ "АЕЦ Козлодуй" ЕАД, Козлодуй.

Приложение 1



Фигура 10.1 Работни диапазони на АКНП

Приложение 2

Таблица 10.1 Погрешност при оценката на реактивността, ПД-1К

Реактивност [Beff]	Време за въвеждане [sec]	Нач.честота [Hz]	Крайна честота [Hz]	Норма σ Beff	Измерено Beff БИЦ 53-Р,БНО-142Р	Отн. Грешка σ [%]	Измерен ток [mA]	Норма на измерен ток [mA]
-20,0000	100	50 000	1	±2%	-20,2487	1,24	0,422	0,42±0,40
-05,0000	30	50 000	1	±2%	-05,0434	0,9	2,643	2,64±0,40
00,0000	1	1	50 000	±2%	00,0000	0	12,62	12,61±0,40
+00,3000	10	1	50 000	±2%	00,2982	0,6	18,06	18,07±0,40
+00,6000	1	0,1	50 000	±2%	00,5995	0,08	19,17	19,18±0,40

Таблица 10.2 Погрешност при оценяване на реактивността, ПД-2К

Реактивност [Beff]	Време за въвеждане [sec]	Нач.честота [Hz]	Крайна честота [Hz]	Норма σ Beff	Измерено Beff БИЦ 53-Р,БНО-142Р	Отн. Грешка σ [%]	Измерен ток [mA]	Норма на измерен ток [mA]
-20,0000	100	50 000	1	±2%	-20,2408	1,20	0,422	0,42±0,40
-05,0000	30	50 000	1	±2%	-05,0396	0,8	2,643	2,64±0,40
00,0000	1	1	50 000	±2%	00,0000	0	12,62	12,61±0,40
+00,3000	10	1	50 000	±2%	00,2990	0,3	18,06	18,07±0,40
+00,6000	1	0,1	50 000	±2%	00,5995	0,08	19,17	19,18±0,40

Таблица 10.3 Погрешност при оценяване на реактивността, ПД-3К

Реактивност [Beff]	Време за въвеждане [sec]	Нач.честота [Hz]	Крайна честота [Hz]	Норма σ Beff	Измерено Beff БИЦ 53-Р,БНО-142Р	Отн. Грешка σ [%]	Измерен ток [mA]	Норма на измерен ток [mA]
-20,0000	100	50 000	1	±2%	-20,2389	1,19	0,422	0,42±0,40
-05,0000	30	50 000	1	±2%	-05,0383	0,8	2,642	2,64±0,40
00,0000	1	1	50 000	±2%	00,0000	0	12,62	12,61±0,40
+00,3000	10	1	50 000	±2%	00,2991	0,3	18,06	18,07±0,40
+00,6000	1	0,1	50 000	±2%	00,5999	0,016	19,17	19,18±0,40

Таблица 10.4 Погрешност при оценяване на реактивността, СКП-1К

Реактивност [Beff]	Време за въвеждане [sec]	Нач.честота [Hz]	Крайна честота [Hz]	Норма σ Beff	Измерено Beff БИЦ 53-Р,БНО-142Р	Отн. Грешка σ [%]	Измерен ток [mA]	Норма на измерен ток [mA]
-20,0000	100	50 000	1	±2%	-19,9300	0,35	0,419	0,42±0,40
-05,0000	30	50 000	1	±2%	-05,0001	0,002	2,639	2,64±0,40
00,0000	1	1	50 000	±2%	00,0002	0,02	12,611	12,61±0,40
+00,3000	10	1	50 000	±2%	00,3001	0,033	18,071	18,07±0,40
+00,6000	1	0,1	50 000	±2%	00,6001	0,016	19,181	19,18±0,40

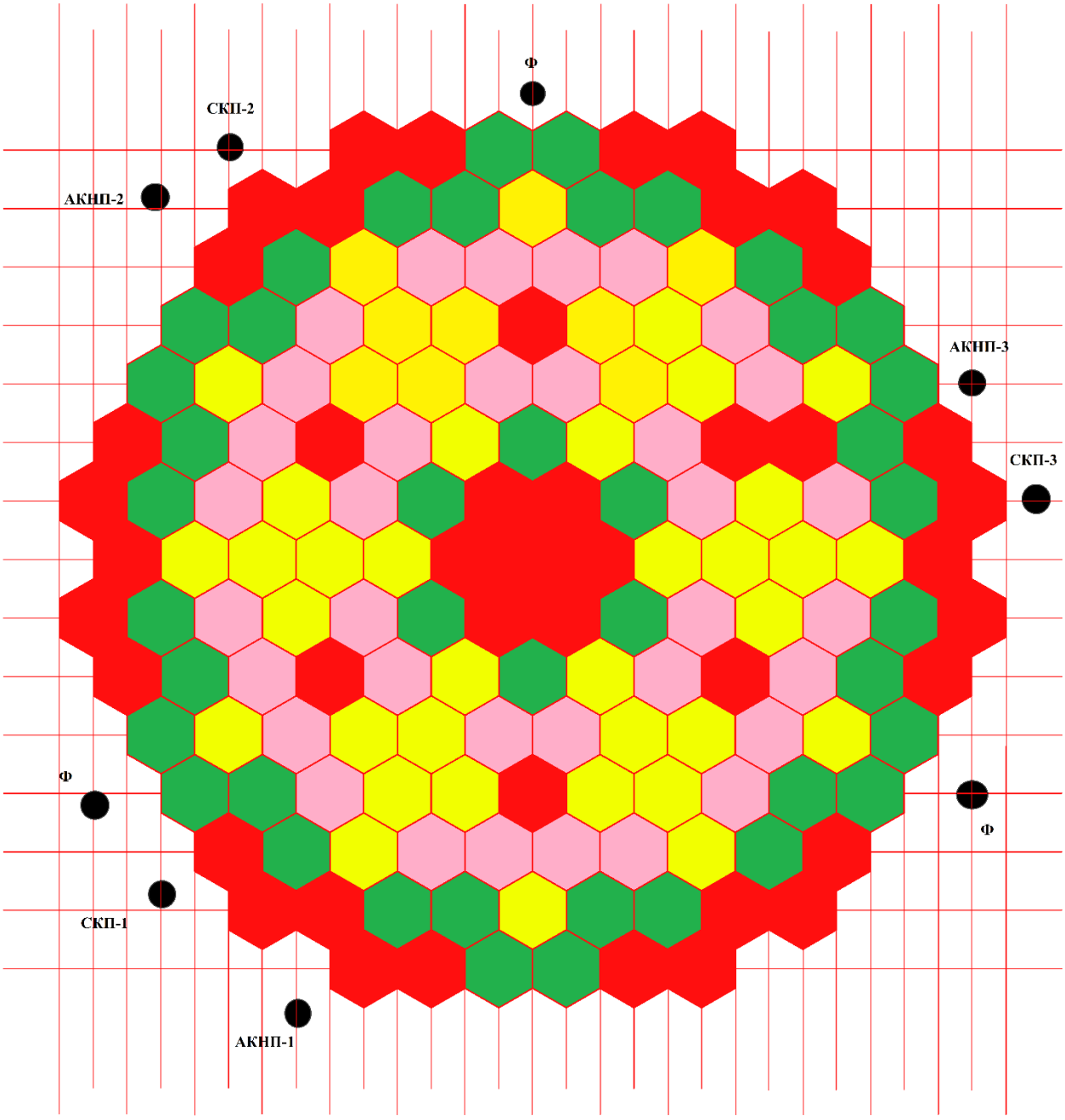
Таблица 10.5 Погрешност при оценяване на реактивността, СКП-2К

Реактивност [Beff]	Време за въвеждане [sec]	Нач.честота [Hz]	Крайна честота [Hz]	Норма σ Beff	Измерено Beff БИЦ 53-Р,БНО-142Р	Отн. Грешка σ [%]	Измерен ток [mA]	Норма на измерен ток [mA]
-20,0000	100	50 000	1	±2%	-19,9332	0,33	0,419	0,42±0,40
-05,0000	30	50 000	1	±2%	-04,9898	0,2	2,639	2,64±0,40
00,0000	1	1	50 000	±2%	00,0001	0,01	12,611	12,61±0,40
+00,3000	10	1	50 000	±2%	00,3001	0,033	18,071	18,07±0,40
+00,6000	1	0,1	50 000	±2%	00,6001	0,016	19,181	19,18±0,40

Таблица 10.6 Погрешност при оценяване на реактивността, СКП-3К

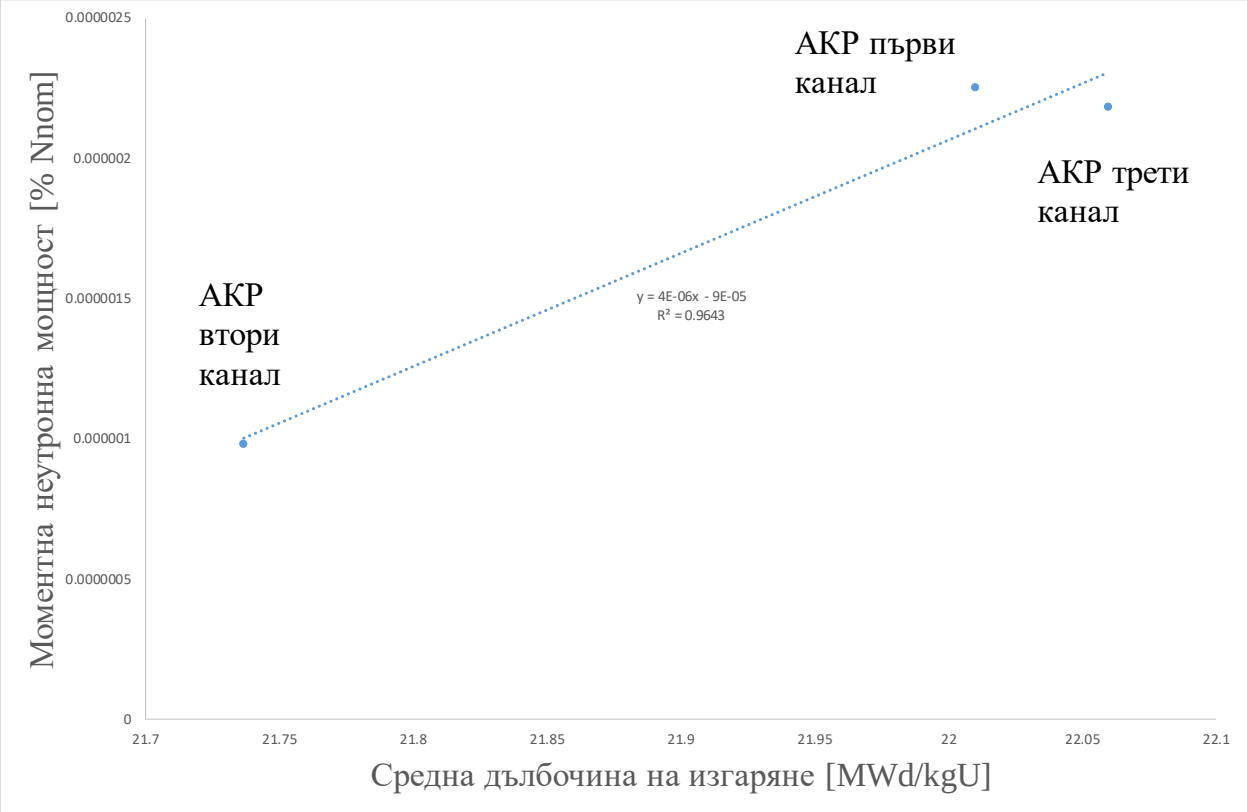
Реактивност [Beff]	Време за въвеждане [sec]	Нач.честота [Hz]	Крайна честота [Hz]	Норма σ Beff	Измерено Beff БИЦ 53-Р,БНО-142Р	Отн. Грешка σ [%]	Измерен ток [mA]	Норма на измерен ток [mA]
-20,0000	100	50 000	1	±2%	-19,9336	0,33	0,419	0,42±0,40
-05,0000	30	50 000	1	±2%	-04,9998	0,2	2,639	2,64±0,40
00,0000	1	1	50 000	±2%	00,0001	0,01	12,611	12,61±0,40
+00,3000	10	1	50 000	±2%	00,3001	0,033	18,071	18,07±0,40
+00,6000	1	0,1	50 000	±2%	00,6001	0,016	19,181	19,18±0,40

Приложение 3



Фигура 10.2 Разположение на детекторите и топлоотделящите касети в Ак3

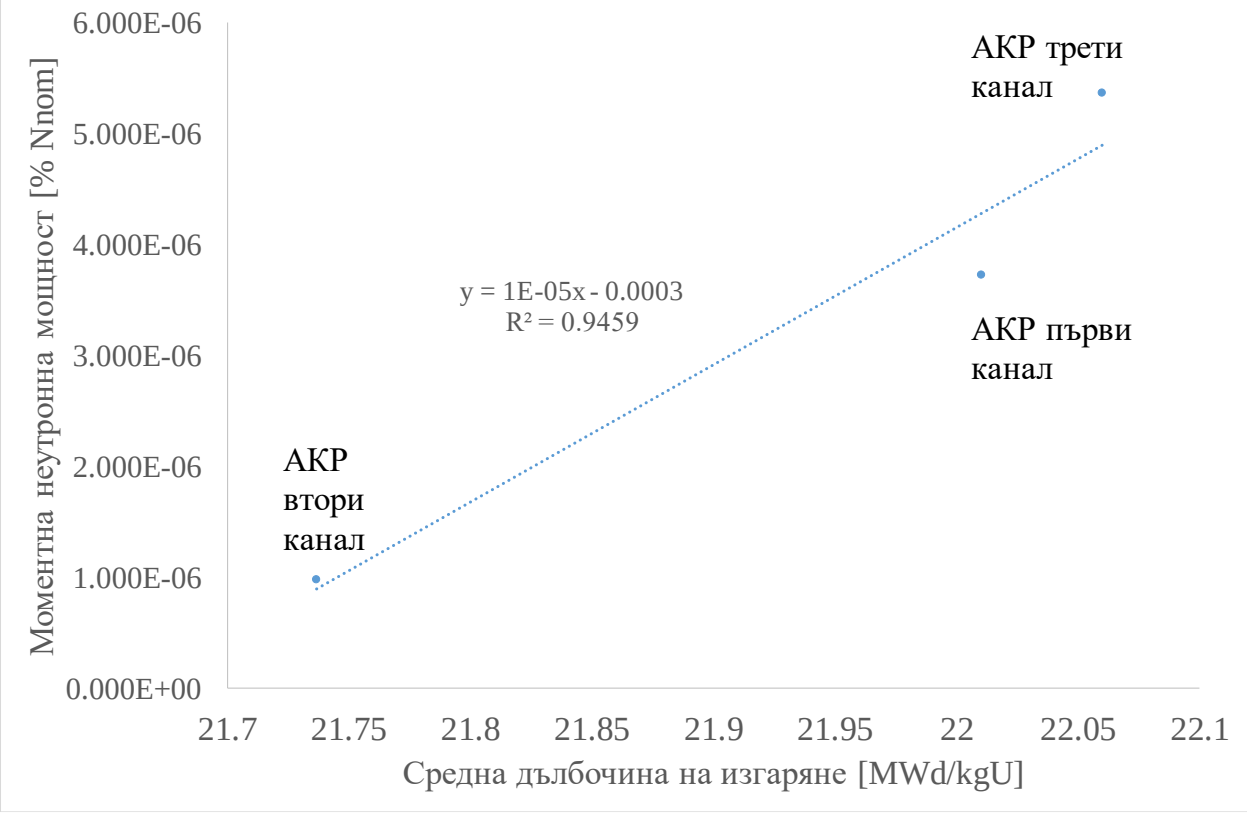
Приложение 4



Фигура 10.3 Неутронните мощности оценени от АКР чрез входен сигнал от АКНП като функция на средната дълбочина на изгаряне около касетите на АКНП след превключването на АКР от СКП към АКНП

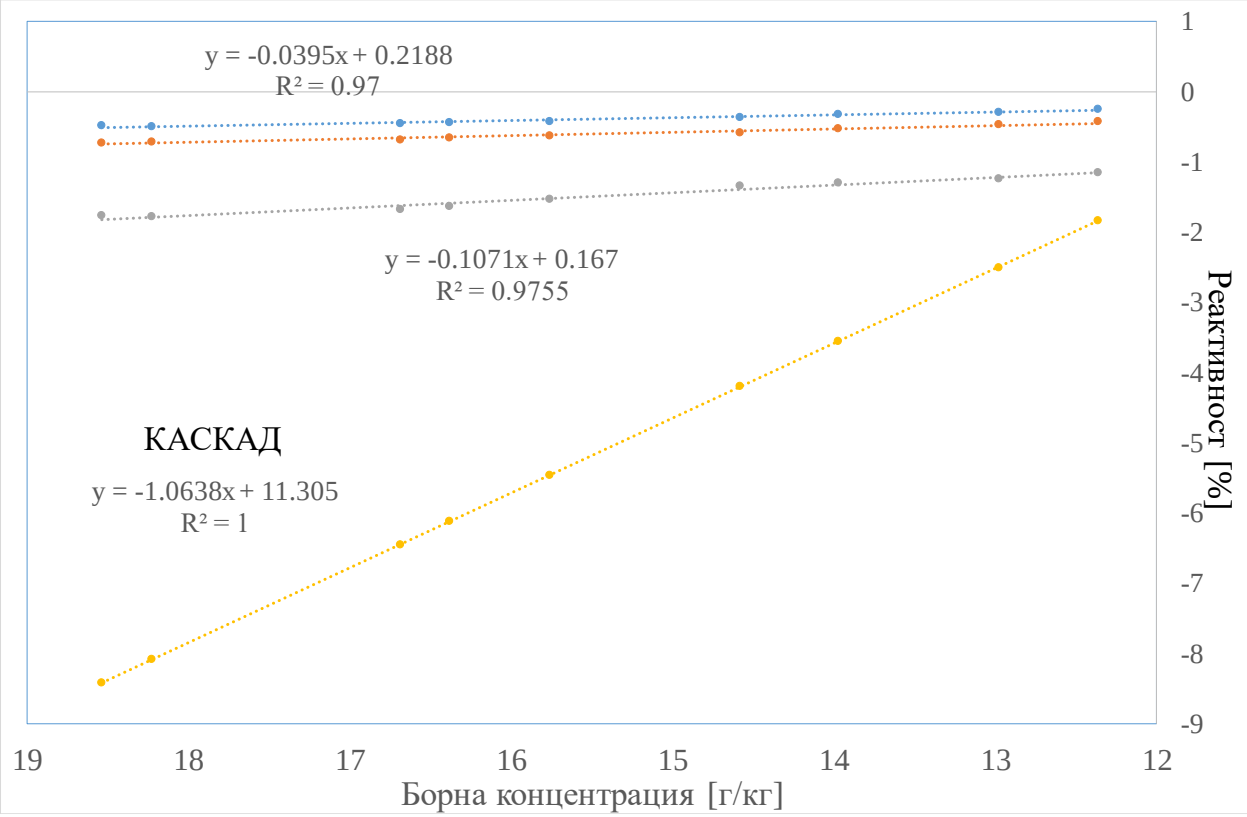
Таблица 10.7 Моментните неутронни мощности преди и след промяната на входния сигнал на АКР от СКП към АКНП и средните дълбочини на изгаряне около камерите на СКП и АКНП

Средна дълбочина на изгаряне около камери СКП и АКНП за първи канал АКР/ моментна неутронна мощност	Средна дълбочина на изгаряне около камери СКП и АКНП за втори канал АКР/ моментна неутронна мощност	Средна дълбочина на изгаряне около камери СКП и АКНП за трети канал АКР/ моментна неутронна мощност
22.16/ 2.187E-06	21.64/ 1.320E-06	21.33/ 4.03E-07
21.01/ 2.184E-06	21.73/ 1.213E-06	22.06/ 2.25E-06

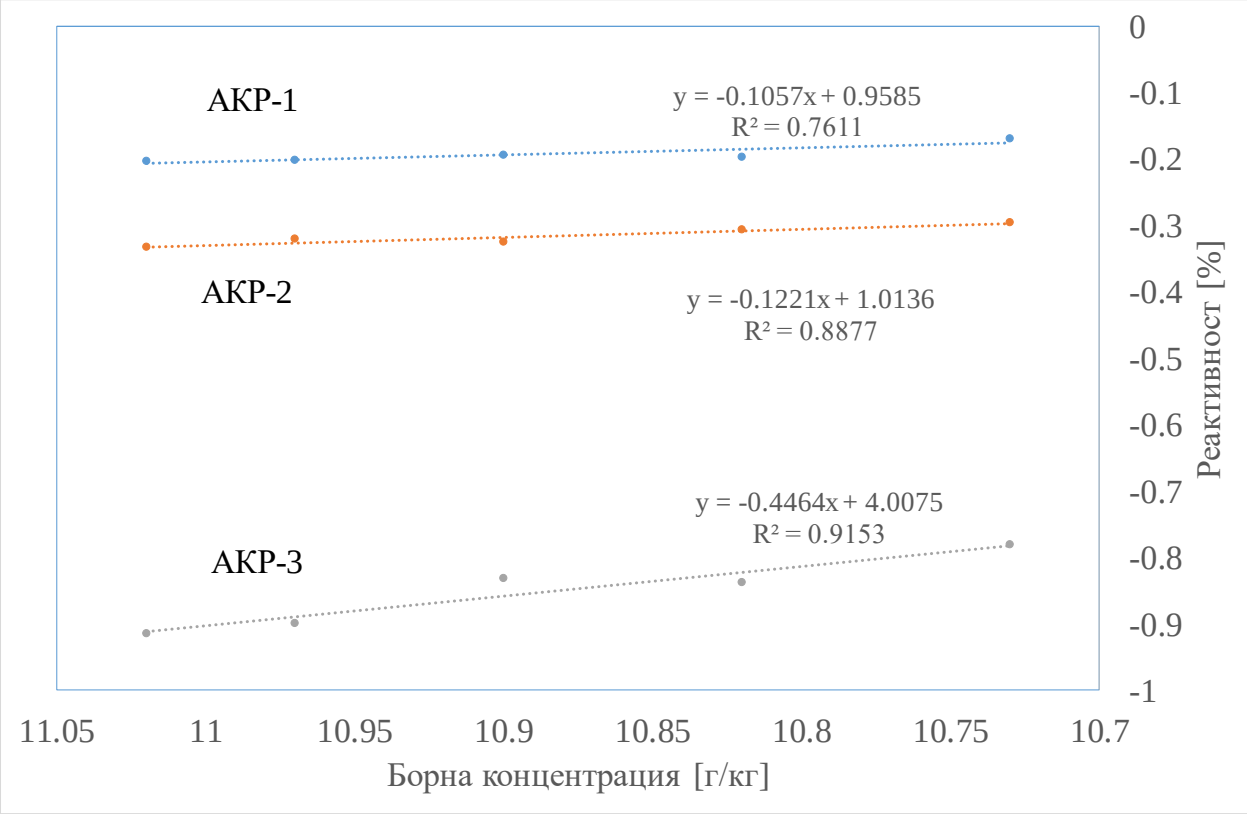


Фигура 10.4 Моментната неутронна мощност по трите канала АКР с входен сигнал от АКНП като функция на средната дълбочина на изгаряне около камерите на АКНП в по-късен момент след превключването на АКР от СКП към АКНП

Приложение 5

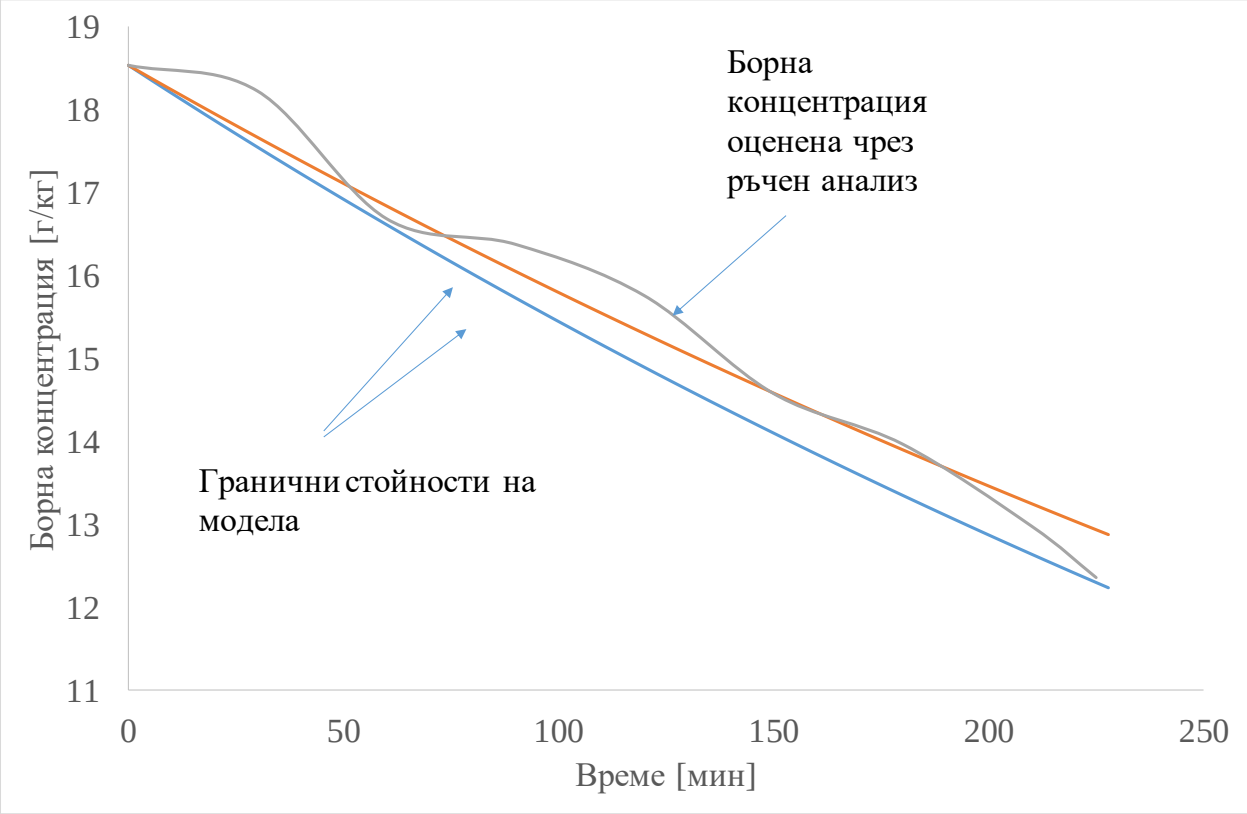


Фигура 10.5 Реактивността по трите канала АКР с входен сигнал от СКП по време на водообмен с 40м3/час като функция на концентрацията на борна киселина в първи контур

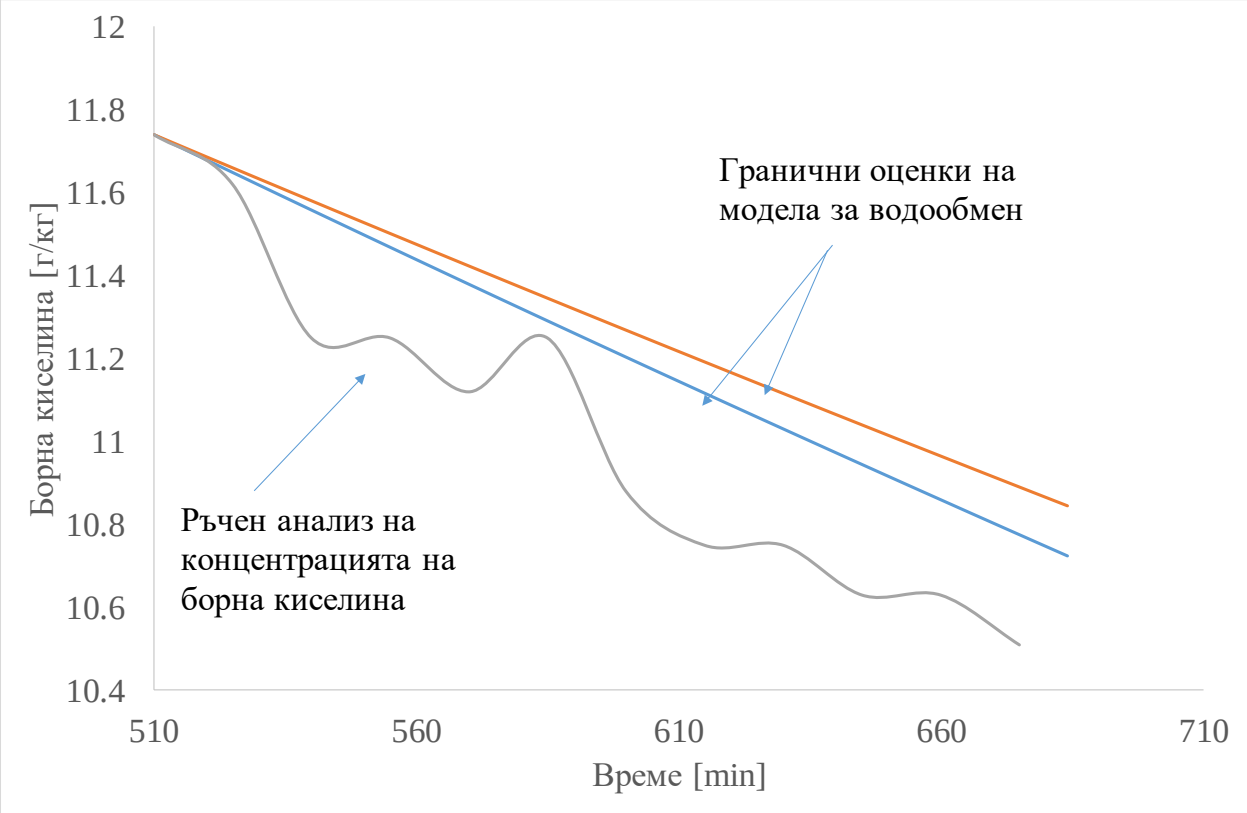


Фигура 10.6 Реактивността по трите канала АКР с входен сигнал от СКП по време на водообмен с 10м3/час като функция на концентрацията на борна киселина в първи контур

Приложение 6

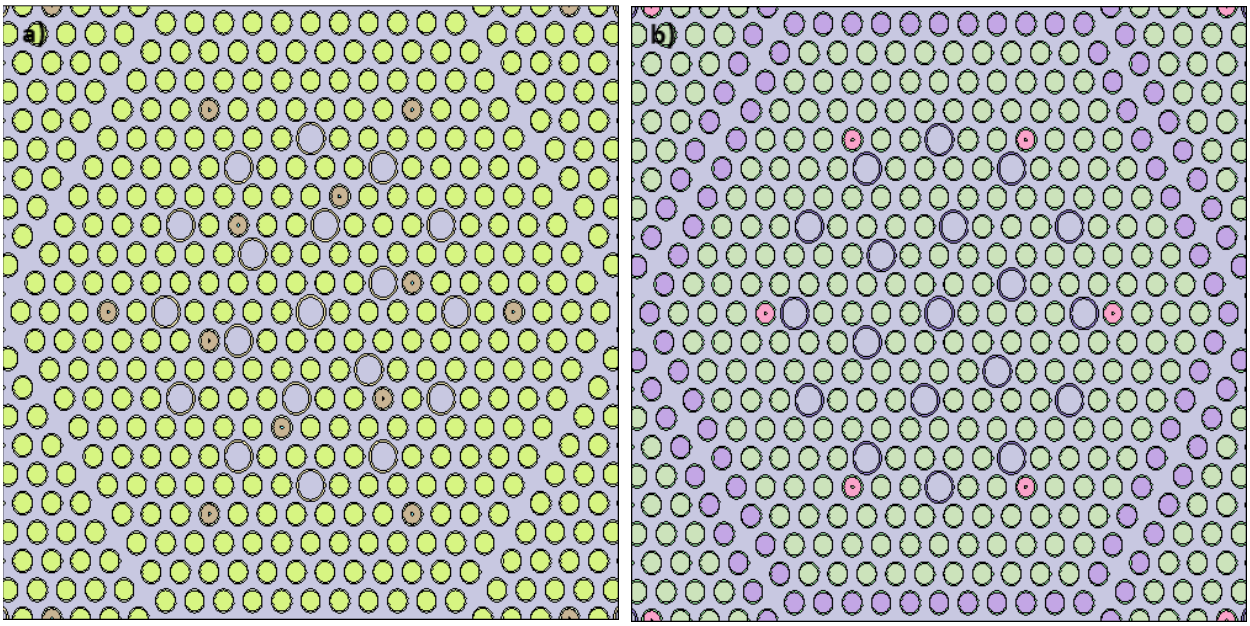


Фигура 10.7 Сравнение на оценената борна киселина от ръчен анализ с граничните стойности на модела за водообмен с 40м3/час



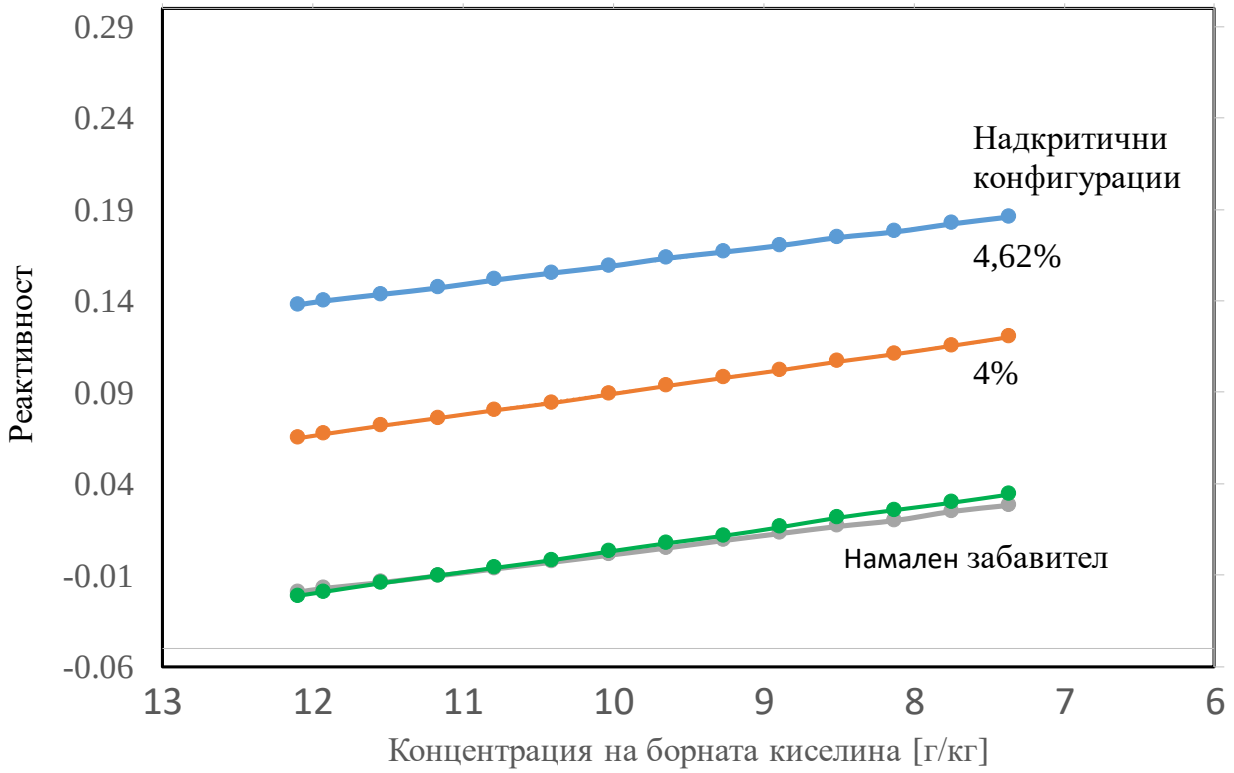
Фигура 10.8 Сравнение на оценената борна киселина от ръчен анализ с граничните стойности на модела за водообмен с 10м3/час

Приложение 7



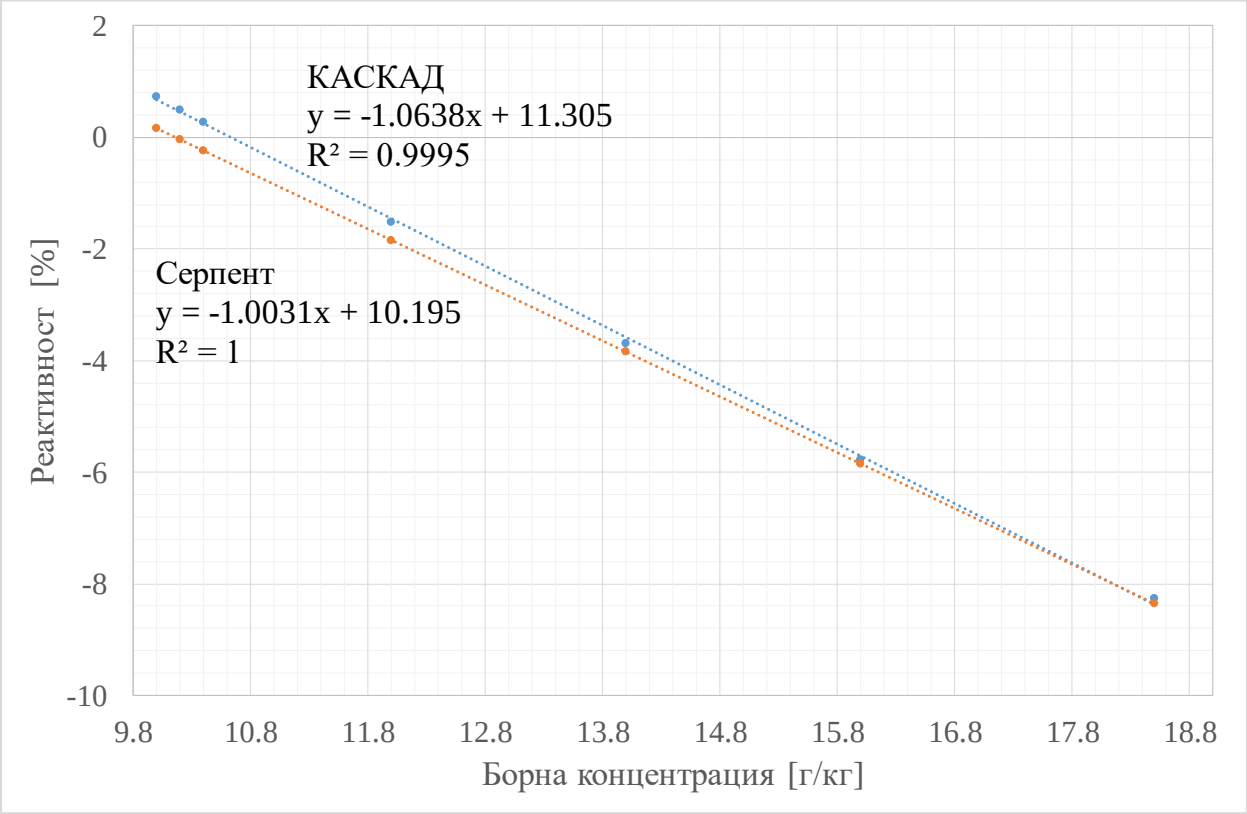
Фигура 10.9 Изобразяване на моделираните топлоотделящи касети чрез Serpent plotter: а) със средно обогатяване 4,0% ; б) със средно обогатяване 4,62 %

Приложение 8



Фигура 10.10 Графично представяне на резултатите от Монте Карло симулациите на хода на реактивността за двете касети с и без намален забавител.

Приложение 9



Фигура 10.11. Сравнение на симулирания ход на реактивността чрез модела на касета със средно обогатяване 4,62 % и намален забавител с пресметнатия от КАСКАД

Приложение 10

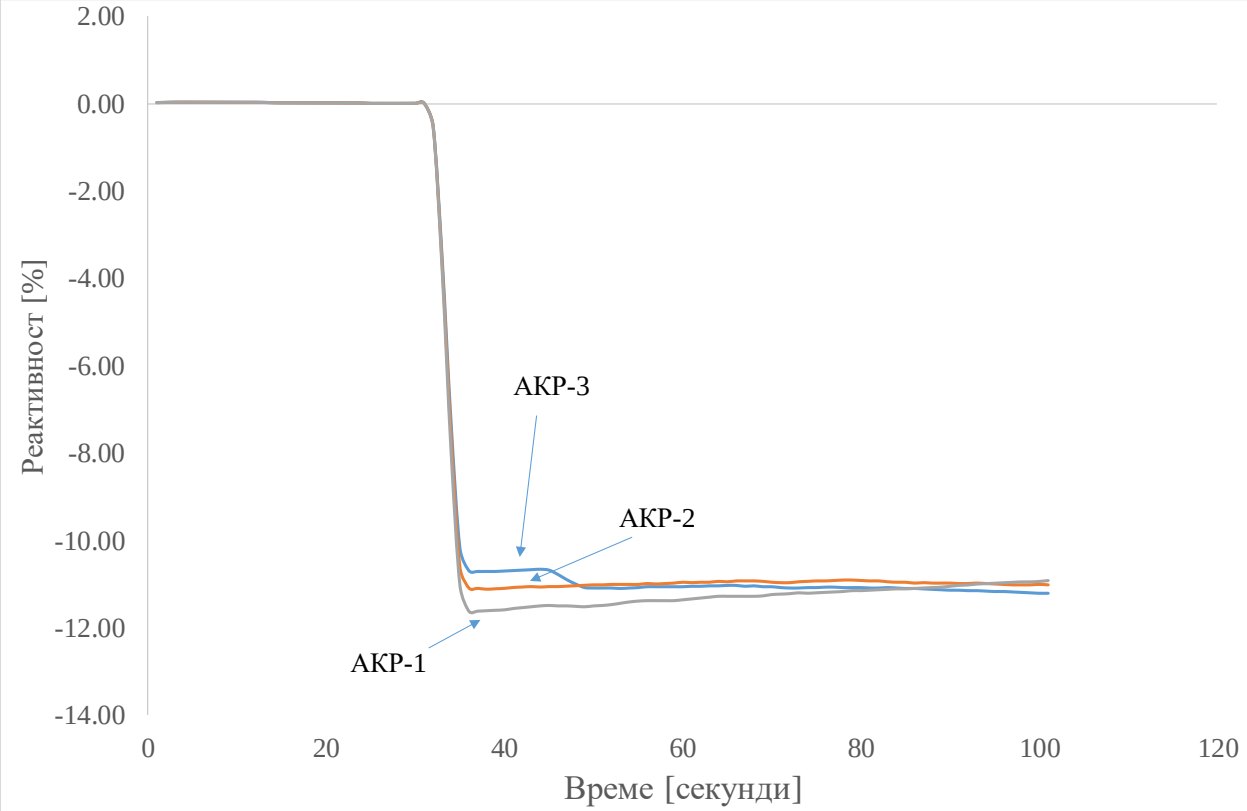
```
 GNU nano 3.2                                                    /home/apimp

set title "VVER-1000 MKN Criticality Calculation"


set opti 3

% --- Fuel pins:

% --- Guide tube  CHECKED
pin 1
water   0.5500
tube    0.6500
water

% --- Cluster channel  CHECKED
pin 2
water 0.5450
tube  0.6300
water

% --- UO2 fuel rod 4.7% CHECKED
pin 3
UO2a    0.3960
gap     0.3965
clad    0.4555
water

% --- UO2 fuel rod 4.4% CHECKED
pin 4
UO2b    0.3960
gap     0.3965
clad    0.4555
water

% --- Gadolinium fuel rod 3.6% CHECKED

pin 5
center  0.0600
UO2Gd   0.3800
gap     0.3865
clad    0.4555
water

pin 6
water
```

```
 GNU nano 3.2                                                                  /home/apim

% --- Pin lattice:

lat 110  2  0.0 0.0 25 25  1.275
6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6
 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6
  6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 6 6
   6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 6 6
    6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 6 6
     6 6 6 6 6 6 6 6 6 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 6 6
      6 6 6 6 6 6 6 6 4 3 3 3 5 3 3 2 3 3 5 3 3 3 4 6 6
       6 6 6 6 6 6 6 4 3 3 3 3 2 3 3 3 3 2 3 3 3 3 4 6 6
        6 6 6 6 6 6 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 6 6
         6 6 6 6 6 4 3 3 3 2 3 3 3 2 3 3 3 3 2 3 3 3 4 6 6
          6 6 6 6 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 3 3 3 3 3 3 4 6 6
           6 6 6 4 3 3 3 3 3 3 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 6 6
            6 6 4 3 3 3 5 2 3 3 3 3 1 3 3 3 3 2 5 3 3 3 4 6 6
             6 6 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 2 3 3 3 3 3 3 3 4 6 6 6
              6 6 4 3 3 3 3 3 3 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 6 6 6 6
               6 6 4 3 3 3 3 2 3 3 3 3 2 3 3 3 3 2 3 3 3 4 6 6 6 6 6
                6 6 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 6 6 6 6 6 6
                 6 6 4 3 3 3 3 2 3 3 3 3 2 3 3 3 3 4 6 6 6 6 6 6 6 6
                  6 6 4 3 3 3 5 3 3 2 3 3 5 3 3 3 4 6 6 6 6 6 6 6 6 6
                   6 6 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 6 6 6 6 6 6 6 6 6
                    6 6 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6
                     6 6 4 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6
                      6 6 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 4 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6
                       6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6
                        6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6 6
% --- assembly data:

%surf FUELASS  hexyc  0.0 0.0 11.755
surf FUELASS  hexyc  0.0 0.0 11.700
surf MODER    hexyc  0.0 0.0 11.727

cell INS  0  fill 110   -FUELASS
cell REG  0  water       FUELASS  -MODER
cell OUT  0  outside              MODER

% --- Materials:

% --- enrichment 4.7%
mat UO2a   -10.4570
92235.06c  -0.0414
92238.06c  -0.840
 8016.06c  -0.118
```

```
  GNU nano 3.2                                                                /home/apimp

% --- enrichment 4.4%
mat UO2b   -10.4570
92235.06c  -0.038
92238.06c  -0.953
 8016.06c  -0.118

mat UO2Gd  -10.36100
92235.06c -0.030147
92238.06c -0.807269
64154.06c -9.2612E-04
64155.06c -6.3283E-03
64156.06c -8.8092E-03
64157.06c -6.7781E-03
64158.06c -1.0827E-02
64160.06c -9.6486E-03
 8016.06c -0.125118

% --- Zr-1%Nb  E110 o.c. shroud tube: Checked
mat clad    -6.550000
40000.06c   -0.988605
41093.06c   -0.010000
 8016.06c   -0.000845
26000.06c   -0.000550


% --- Zr-1%Nb E635 chanel tube: Checked
mat tube    -6.58000
  40000.06c   -0.97305
  41093.06c   -0.01050
  50000.06c   -0.01260
  26000.06c   -0.00385


mat water -0.77293 tmp 608 moder lwtr 1001 rgb 200 200 225
 8016.06c -8.8603E-01
 1001.06c -0.2100E-01
 5010.06c -6.4685E-04
 5011.06c -2.5874E-03
mat gap     -4.744E-3
 2000.06c    1.0

mat center   -4.744E-3
 2000.06c    1.0

therm lwtr 608  lwj3.11t lwj3.13t
```

```
  GNU nano 3.2                                                    /home/apimp

% --- Cross section library file path:

set acelib "sss_endfb7u.xsdata"

% --- Periodic boundary condition:

set bc 3

% --- Neutron population and criticality cycles:

set pop 6000 300  30

% --- Geometry and mesh plots:

plot 3 500 500
mesh 3 500 500

% --- Decay and fission yield libraries:

set declib "sss_endfb7.dec"
set nfylib "sss_endfb7.nfy"

% --- Irradiation cycle:

%set powdens 38.6E-2

% --- universe = 0
% --- symmetry = 12
% --- two group structure

set gcu   0
set sym  12
set nfg 2 0.62E-6

% --- Nuclide inventory:

set inventory all


% --- Print material composition
set printm 1

% --- History output
set his 1

% --- Print all reactions
set arr 2
```

Приложение 11



Фигура 10.12 Показанията на трите канала на АКР с входен сигнал от АКНП по време на падане на аварийната защита