СОФИЙСКИ УНИВЕРСИТЕТ „СВЕТИ КЛИМЕНТ ОХРИДСКИ”

Физически факултет

Катедра Атомна физика

ДИПЛОМНА РАБОТА

НА ТЕМА

Изследване на аксиално-офсетните аномалии при нормална експлоатация на ядрените реактори

Изготвил: **Кристиана Руменова Атанасова**
Магистърска програма: Ядрена енергетика и технологии
Фак. № 0РН3700004

Научен ръководител: доц. Д-р Пламен Петков

Рецензент: доц. Д-р Боян Тодоров

PLAMEN VESKOV PETKOV
Digitally signed by PLAMEN VESKOV PETKOV
Date: 2025.09.19 18:39:27 +03'00'

София

2025

Съдържание

1 УВОД. ОБЗОР НА ПРОБЛЕМА И МЕТОДИ ЗА АНАЛИЗ....4
1.1 Кратка история на проблема АОА....4
1.2 Дефиниция и основи на проблема....4
1.3 Методи за анализ на АОА....5
2 ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ НА ДИПЛОМНАТА РАБОТА....5
3 ТЕОРЕТИЧНИ ОСНОВИ НА ПРОБЛЕМА АОА....6
3.1 Нестационарни режими на работа на реакторната установка....6
3.1.1 Отравяне на активната зона на реактора....6
3.1.2 Регулиране на мощността на реакторната установка чрез АО....7
3.2 Стационарни режими на възникване на АО....11
3.2.1 Наблюдения при нормална експлоатация в АЕЦ Кршко....11
3.2.2 Основи на проблема и хипотези....13
4 АНАЛИЗ НА ПРОБЛЕМА СЪС СТАЦИОНАРНИТЕ ОТКЛОНЕНИЯ НА АО....13
4.1 Теоретичен модел за връзката между енергоотделянето и водохимичния режим на първи контур....16
5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ....25
ЛИТЕРАТУРА....26

Списък на фигурите

Фигура 1 Промяната на характеристиките на топлоносителя в РУ с ВВЕР-1000 при различни програми за регулиране в зависимост от мощността: температура на топлоносителя на изхода от активната зона tvux (1); средна температура на топлоносителя в активната зона tsr (2); температура на топлоносителя на входа в активната зона tvx (3); температура на наситената пара във втори контур ts (4); налягане на парата във втори контур pII (5) 9

Фигура 2 Ааксиален профил на три избрани състояния. a) началото на 15-та кампания на 5 блок (11еф.ден.) в касета №4 за 1-ва година в активната зона; b) началото на 15-та кампания на 5 блок (11еф.ден.) в касета №108 за 2-ра година в активната зона; c) началото на 14-та кампания на 5 блок (9еф.ден.) в касета №4 за 1-ва година в активната зона; ……..... 15

Фигура 3 Поддържане на водо-химичния режим на първи контур в АЕЦ с ВВЕР 1000…..... 18

Фигура 4 Изменение на концентрацията на K в g/kg , спрямо температура на средата. 21

Фигура 5 Изменението на концентрацията на $B(OH)_4$ в g/kg, спрямо температура на средата……. 22

Фигура 6 Изменението на концентрацията на $B_2(OH)7$ в g/kg, спрямо температура на средата……. 22

Фигура 7 Изменението на концентрацията на B3(OH)10 в g/kg, спрямо температура на средата …… 23

Фигура 8 Изменението на концентрацията на B4(OH)14 в g/kg, спрямо температура на средата……. 23

Фигура 9 Изменението на концентрацията на B5(OH)18 в g/kg, спрямо температура на средата……. 24

Фигура 10 Изменението на pH , спрямо температура на средата…… 24

Списък на таблиците

Таблица 1 Резултатите от анализа на влиянието на основните възбуждащи въздействия върху АО и реактивността, причинени от промяната на всеки от параметрите. [6] …… 11

Таблица 2 Входни данни от програмата..…… 21

1 УВОД. ОБЗОР НА ПРОБЛЕМА И МЕТОДИ ЗА АНАЛИЗ

1.1 Кратка история на проблема АОА

За първи път аксиално-офсетните аномалии (АОА) са били наблюдавани по време на цикъл 9, на АЕЦ “Callaway”. АОА е бил толкова значим, че централата е била принудена да намали мощността до 70 процента за приблизително 4 месеца, за да запази пределите за безопасна експлоатация. През този период и до края на цикъл 9 е бил направен опит да се анализира проблема. През следващата кампания, цикъл 10, аксиалното изместване в началото е било дори по-отрицателно от предвиденото и е било очевидно, че феноменът не е бил разбран и че използваните аналитични инструменти трябваше да бъдат коригирани. През целия цикъл 10, са били изпълнени периодични актуализации на софтуера за предсказване на развитието на изгарянето на горивото през кампанията. За първата част от кампания №11, съгласието между прогнозното и измереното аксиално изместване е било доста добро. Въпреки това, при изгаряне от около 7 GWD/MTU отново е била наблюдавана аномалия на аксиалното изместване. Оттогава насам спорадично проблемът възниква на различни АЕЦ и се работи не само върху мерки за отстраняване на проблема но и върху неговото фундаментално разбиране.

1.2 Дефиниция и основи на проблема

Количествена мярка за равномерността на отделянето на енергия по височината на активната зона, и съответно за устойчивостта на реактора, е аксиалният офсет (АО), [3]. Ако приемем, че:

- Qв е мощността на горната половина на активната зона,
- Qн е мощността на долната половина,
- Qа.з. е общата мощност на активната зона,

тогава АО се определя като:

$$AO = \frac{Q_{\text{в}} - Q_{\text{н}}}{Q_{\text{а.з.}}}$$

(1)

АОА е явление при работата на водо-воден реактор (ВВЕР, PWR), при което се наблюдава необичайно и по-голямо от очакваното изменение в аксиалното разпределение на неутронния поток и реакторната мощност в ядреното гориво. Това води до отклонение на топлинния поток от нормалния профил, обикновено изразено като намаление на неутронния поток в определена зона по дължината на горивото, което не може да се обясни с класическите модели. Един от ключовите проблеми, наблюдавани при този режим на експлоатация, е т. нар. АОА, при която се нарушава равномерността на неутронния поток по височината на активната зона на реактора.

1.3 Методи за анализ на АОА

Методите за анализ на АОА включват термохидравлични и неутронно-физични симулации, проследяване на поведението на отлаганията (crud) и лабораторни изследвания на използвани горивни елементи. Научните усилия се фокусират върху идентифициране на критичните фактори – състав на охлаждащата среда, алкални агенти, източници на корозионни продукти – както и върху разработване на стратегии за превенция. Сред предложените подходи са оптимизация на водно-химичния режим, използване на различни алкализиращи агенти (например замяна на LiOH с KOH, където се използва), и прилагане на технологии за почистване на презаредените касети, като ултразвуково отстраняване на отлаганията.

2 ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ НА ДИПЛОМНАТА РАБОТА

При разработването на настоящата дипломна работа беше поставена цел, дипломатът да се запознае с причините за възникване на АОА. Аномалиите могат да се разделят два основни класа: породени от нестационарни неутронно-физични физични процеси (нестационарни) и такива, които са породени в режими на стационарна експлоатация на реакторната установка, чиято природа до настоящия момент не е установена. В дипломната работа е разгледана възможността тези проблеми да бъдат породени от дисоциацията на борната киселина при високи температури и налягане на първи контур в ядрените реактори.

3 ТЕОРЕТИЧНИ ОСНОВИ НА ПРОБЛЕМА АОА

3.1 Нестационарни режими на работа на реакторната установка

3.1.1 Отравяне на активната зона на реактора

Поради неравномерното изменение на характеристиките на активната зона (например температура, плътност на топлоносителя и др.) при промяна на нивото на мощност на реакторната установка, възникват ксенонови колебания. В някои случаи – например в края на горивната кампания – те могат да доведат до загуба на устойчивост на ядрения реактор. Ксеноновите колебания оказват влияние върху разпределението на енерготделяне в активната зона на реактора в три направления: радиално, азимутално и аксиално.

Радиалните колебания могат да възникнат в резултат на преместване на органите за регулиране (ОР) на системата за управление и защита (СУЗ), които са разположени близо до периферията на активната зона на реактора. При такива въздействия реакторът остава в устойчиво състояние през цялата горивна кампания. В края на кампанията радиалната устойчивост дори се увеличава.

Азимуталните колебания се появяват при последователно извеждане от активната зона на вече потопени ОР на СУЗ, които са разположени симетрично близо до периферията. Подобно на радиалните колебания, азимуталните почти не влияят върху разпределението на отделената енергия в реактора, и това се наблюдава само при ниска дълбочина на изгаряне на ядреното гориво.

Аксиалните колебания възникват при преминаване от едно ниво на мощност към друго. Това се дължи на неравномерното изменение на технологичните параметри спрямо техните стационарни стойности по височината на активната зона. Такива параметри включват преди всичко: температурите на топлоносителя от първи контур (на входа, средна и на изхода от активната зона), температурата на ядрено гориво, плътността на топлоносителя, както и топлинната мощност в горната и долната част на активната зона. Това неравномерно изменение води до неравномерно натрупване и изгаряне на ксенон (нестабилно ксеноново отравяне) . Те се отразяват значително върху АО.

Нестационарното ксеноново отравяне на активната зона (АЗ) на реактора въвежда положителна обратна връзка към всяко отклонение на неутронния поток. Тъй като ефектът на реактивността, предизвикан от промяна в температурата на топлоносителя, е бърз, а отравянето — бавен процес, който съвпада по знак с промяната на неутронния поток и я усилва чрез положителната обратна връзка, управлението на разхода на енергия в активната зона при маневриране на мощността на реакторната установка (РУ) може да бъде осигурено чрез избор на температурен режим на топлоносителя, който съответства на максимална аксиална стабилност на полето на разход на енергия.

3.1.2 Регулиране на мощността на реакторната установка чрез АО

За да се обоснове теоретично този проблем, нека да се разгледа изменението на АО в безкрайно малка околност ΔАО в уравнение (1). Тогава изменението на офсета може да се представи като :

$$AO = AO_0 + \Delta AO \tag{2}$$

Съответно:

- $Q_в = Q_{в,0} + \Delta Q_в$,
- $Q_н = Q_{н,0} + \Delta Q_н$,
- $Q_{а.з.} = Q_{а.з.,0} + \Delta Q_{а.з}$.

където индексът „0“ обозначава стационарните (установени) стойности.

При достатъчно малки отклонения, за да се извърши линеаризация, се изразява изменението на мощността в горната и долната половина на активната зона в зависимост от изменението на средната температура на топлоносителя в съответната половина:

$$\Delta Q_в = \Delta T / \Delta Q \cdot \Delta T_в,$$

$$\Delta Q_н = \Delta T / \Delta Q \cdot \Delta T_н \tag{3}$$

Отношението ΔQ / ΔT представлява чувствителността на мощността на реакторната установка спрямо изменението на средната температура на топлоносителя. То се определя чрез температурния и мощностния коефициент на реактивност k_T и k_N:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta T} = \frac{\Delta \rho}{\Delta T}\frac{\Delta Q}{\Delta \rho} = k_T \cdot k_N$$

(4)

След заместване на (2) и (3) в уравнението (1) и извършване на линеаризация, се получава израз за малкото изменение на АО в зависимост от температурните отклонения:

$$\Delta AO = \left(\frac{\Delta Q}{\Delta T}\right) \cdot N_{\text{a.z.},0}^{-1} \cdot (1 - AO_0) \cdot \left(\overline{\Delta T_B} - (1 + AO_0) \cdot \overline{\Delta T_H}\right)$$

(5)

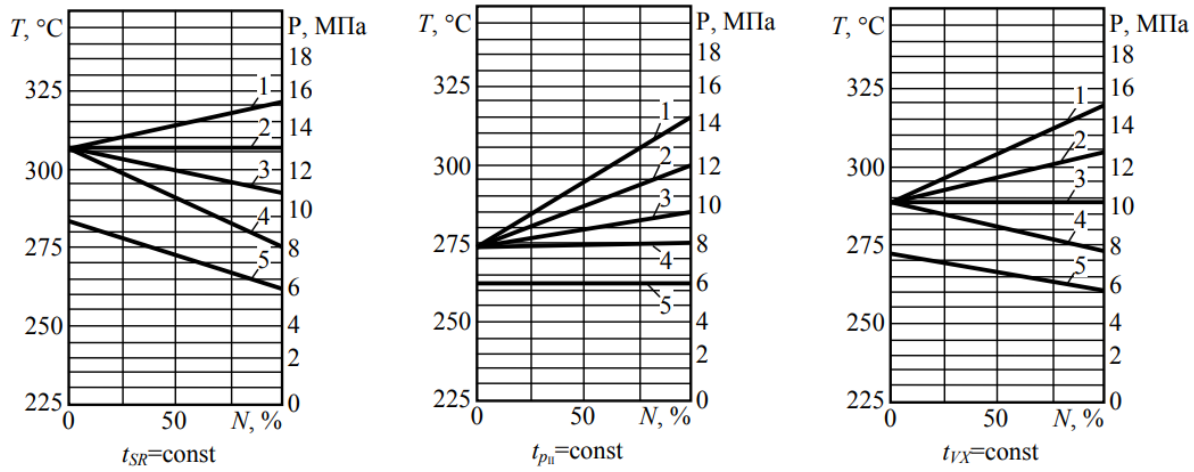
При допускане, че $AO_0 \ll 1$, уравнението може да бъде опростено до:

$$\Delta AO = \frac{\Delta Q}{\Delta T} N_{(\text{a.з.0})}^{(-1)} \left(\overline{\Delta T_B} - \overline{\Delta T_{\text{H}}}\right)$$

(6)

Израз (6) може да се използва като критерий за ефективността на температурния режим на топлоносителя по отношение на стабилността на АО в хода на изследване на програми за маневриране на мощността на реакторната установка. Най-ефективното управление на мощността на енергиен блок е това, при което ΔАО е минимално. За да се покаже ролята на АО при нестационарните режими, ще бъдат разгледани добре познатите програми за регулиране на мощността при енергоблокове с реактори тип ВВЕР-1000. Всяка от основните програми за регулиране има своите предимства и недостатъци по отношение на промяната на АО по време на маневриране с мощността. Анализът се провежда в диапазона на мощностите от 100% до 80% (фиг. 1). В програмата за регулиране с постоянна температура на изхода от активната зона (tvx = const) [4, 5] (фиг. 1), при преход от едно ниво на мощност към друго, температурният ефект на реактивността (ТЕР) и мощностният ефект на реактивността (МЕР) се проявяват основно в горната половина на активната зона на реактора. В резултат на това разхода на енергия в горната половина е по-високо от това в долната.

Такова неравномерно отделяне на енергия, което води до изменение на АО, може лесно да бъде компенсирано чрез промяна на положението на управляващата група органи за регулиране (ОР) на системата за управление и защита (СУЗ).



Фигура 1. Промяната на характеристиките на топлоносителя в РУ с ВВЕР-1000 при различни програми за регулиране в зависимост от мощността: температура на топлоносителя на изхода от активната зона tvux (1); средна температура на топлоносителя в активната зона tsr (2); температура на топлоносителя на входа в активната зона tvx (3); температура на наситената пара във втори контур ts (4); налягане на парата във втори контур pII (5)

На фигура 1 е показана промяната на характеристиките на топлоносителя в РУ с ВВЕР-1000 при различни програми за регулиране в зависимост от мощността: температура на топлоносителя на изхода от активната зона tvux (1); средна температура на топлоносителя в активната зона tsr (2); температура на топлоносителя на входа в активната зона tvx (3); температура на наситената пара във втори контур ts (4); налягане на парата във втори контур pII (5)

В програмата за регулиране (tsr = const) [2, 4] (фиг. 1), при преход от едно ниво на мощност към друго, температурният ефект на реактивността (ТЕР) и мощностният ефект на реактивността (МЕР) възникват както в горната, така и в долната половина на реактора, което е свързано с изменението на температурите на топлоносителя на входа (tvx) и на изхода (tvux). При намаляване на мощността tvux намалява, в резултат на което ТЕР в горната половина на реактора е с положителен знак, а tvx се увеличава и ТЕР в долната половина има отрицателен знак. Тъй като мощността намалява, МЕР има положителен знак. Следователно се наблюдава

неравномерна промяна на разхода на енергия по височината на активната зона, която се усилва при връщане към предишното ниво на мощност, което води до възникване на ксенонови колебания.

В програмата за регулиране (pII = const) [2, 4] (фигура 1) се наблюдава намаление на tvx, tsr и tvux. Така ТЕР по височината на цялата активна зона е с положителен знак, но в горната половина този ефект на реактивността е по-силен отколкото в долната, поради по-голямата разлика в промените на температурата на топлоносителя. МЕР също има положителен знак. В резултат на отделянето на енергия в горната половина на реактора е по-голямо отколкото в долната.

В експлоатационната практика състоянието на реактора се характеризира чрез неговата реактивност. Промяната на нивото на мощност се определя от промяната на реактивността. При всяко установено ниво на мощност сумарната реактивност трябва да бъде равна на нула, което се поддържа чрез баланс на реактивностите $\rho_{сумм}$.

Компенсацията на промените в отделянето на енергия в активната зона вследствие на ефектите на реактивността, свързани с физико-енергетичните процеси в реактора, се извършва чрез реактивността, внесена от преместването на регулируемата група органи за регулиране и защита (ОРСУЗ) — $\rho_{ОРСУЗ}$, или чрез реактивността, внесена с добавянето или извеждането на борна киселина от топлоносителя на първи контур — $\rho_{бор.}$ Освен това регулирането чрез ОРСУЗ и борна киселина се използва и за компенсиране на максимума на ксеноновото отравяне — $\rho_{ксенон}$.

Съобразно гореизложеното, изразът за определяне на текущата реактивност е:

$$\rho=\rho_{ОРСУЗ}+\rho_{бор}+\rho_{мощн.}+\rho_{ксенон}+\rho_{темп.} \quad (7)$$

Първите две слагаеми ($\rho_{ОРСУЗ}$ и $\rho_{бор}$) се променят в резултат на управлението на мощността чрез въвеждане на ОР СУЗ или борна киселина в топлоносителя на първи контур, а $\rho_{ксенон}$ възниква като следствие от нееднаквото по височината на активната зона отклонение на технологичните параметри от номиналните стойности (което също води до промяна в $\rho_{мощн.}$ и $\rho_{темп.}$).

За да бъде обяснено качествено как реактивността влияе на АО е необходимо да се разгледа как промените в $\rho_{мощн.}$ и $\rho_{темп.}$ при различни програми за регулиране на мощността влияят върху изменението на температурата и плътността на топлоносителя по височината на активната зона, което води до възникване на ксенонови колебания.

В таблица 1 са представени резултатите от анализа на влиянието на основните възбуждащи въздействия върху АО и реактивността, причинени от промяната на всеки от параметрите.

Основни въздействия, нанасяни върху реактора в резултат на промяна на топлотехническите параметри	Внасяна реактивност	Влияние върху АО (аксиален офсет)
Промяна на топлинната мощност на реактора	$Q \uparrow \rightarrow \rho_{мощн.} \downarrow$ $Q \downarrow \rightarrow \rho_{мощн.} \uparrow$	$AO \uparrow$ $AO \downarrow$
Промяна на положението на регулиращата група ОР СУЗ в активната зона на реактора	$H_{ОРСУЗ} \uparrow \rightarrow \rho_{ОРСУЗ} \downarrow$ $H_{ОРСУЗ} \downarrow \rightarrow \rho_{ОРСУЗ} \uparrow$	$AO \uparrow$ $AO \downarrow$
Промяна на концентрацията на борна киселина в топлоносителя на първи контур	$C_{бор.} \uparrow \rightarrow \rho_{бор.} \uparrow$ $C_{бор.} \downarrow \rightarrow \rho_{бор.} \downarrow$	$AO \downarrow$ $AO \uparrow$
Промяна на температурата на топлоносителя в активната зона на реактора	$t \uparrow \rightarrow \rho_{темп.} \downarrow$ $t \downarrow \rightarrow \rho_{темп.} \uparrow$	$AO \downarrow$ $AO \uparrow$

Таблица 1. Резултатите от анализа на влиянието на основните възбуждащи въздействия върху АО и реактивността, причинени от промяната на всеки от параметрите. [6]

3.2 Стационарни режими на възникване на АО

3.2.1 Наблюдения при нормална експлоатация в АЕЦ Кршко

Аксиалното разпределение на мощността в активната зона на реактора на АЕЦ Кръшко се наблюдава онлайн чрез осевото отклонение на мощността (power axial offset), използвайки инструментална апаратура с детектори за съответния диапазон на мощността [7]. Осевото отклонение (АО) се дефинира като:

$$\text{АО} = \frac{Q_{\text{в}} - Q_{\text{н}}}{Q_{\text{в}} + Q_{\text{н}}}$$

(8)

където $Q_в$ е интегрираната мощност в горната половина на активна зона, а $Q_н$— в долната половина. Съгласието между измереното и предсказаното осево отклонение до +3% е в рамките на допустимите отклонения при измервания и проектиране и се счита за приемливо ([8], [9]). В случай че разликите в осевото отклонение надхвърлят този критерий, трябва да се оцени влиянието им върху анализа на активната зона. Разлики в осевото отклонение над 3% са наблюдавани през последните два експлоатационни цикъла (21, 22) в АЕЦ Кршко и тяхното въздействие върху оперативните и безопасностните граници е оценено. При специализираното наблюдение на осевото отклонение се използват следните методи:

I) Измерено осево отклонение (M-AO) – осевото отклонение на мощността, определено от измерването на разпределението на мощността в активна зона, извършено при условия близки до „горещо пълна мощност“ (100%), с всички контролни пръти извадени и при установено състояние на работа. Измерването се извършва с помощта на подвижна детекторна система (MIDS) за картографиране на потока [10] и се оценява с компютърния пакет INCORE-3D [11] и/или BEACON^{TM} [12]. Като алтернатива, определянето на осевото отклонение на мощността може да бъде извършено чрез системата за наблюдение на разпределението на мощността [7]. Обикновено измерванията се провеждат месечно (т.е. 31 ефективни дни на пълна мощност, EFPD).

II) Предсказано осево отклонение (P-AO) – осевото отклонение на мощността, изчислено от проектанта на активна зона ([13], [14]), съответстващо на 100% мощност, с всички пръти извадени, при равновесни условия на ядрото и при степента на изгаряне (burnup) по време на измерването на разпределението на мощността. Предполага се, че P-AO съответства на установеното състояние на осевото отклонение, съвместимо с ограничението на радиалния фактор на върхове (Radial Peaking Factor, Fxy) [7] при дадената степен на изгаряне.

III) Delta осево отклонение (D-AO) – разликата между M-AO и P-AO. Положителна стойност на D-AO означава, че измереното осево отклонение е по-положително от предсказаното, а отрицателна стойност означава, че измереното осево отклонение е по-отрицателно от предсказаното.

3.2.2 Основи на проблема и хипотези

Във връзка със съвременните изисквания към ефективността на реакторите PWR, се наблюдава тенденция към използване на ядрено гориво с по-висока степен на обогатяване по изотоп U-235. Това позволява по-дълги горивни кампании (до 48 месеца) и по-висока дълбочина на изгаряне, но също така поражда редица нови предизвикателства. При стандартни условия неутронният поток трябва да бъде сравнително постоянен по височина на активната зона. В случаите на АОА обаче, най-често се отчита неочаквано понижение на потока в горната част на горивните касети. Причините за това явление са комплексни, но съществен фактор може би е образуването на отложения от корозионни продукти, в които се натрупват химични съединения на бор (предимно борати). Тези натрупвания водят до повишена локална концентрация на B-10, което оказва влияние върху реактивността чрез ефекта на свръхмодериране, предизвиквайки неравномерно разпределение на мощността.

Аномалията също така може да бъде свързана с натрупване на депозити (например борна киселина и други отлагания) върху горивните пръти, което променя неутронния спектър и реакторната химия, и е резултат от взаимодействието между първичната химия на водата и дизайна на ядрото. Тази аномалия може да повлияе на безопасността и ефективността на реактора и изисква специално внимание при управление на забавителя в първи контур и оптимизация на дизайна на активната зона, [1]. Отлаганията, известни още като „crud“, се образуват основно при условия на мехурчесто кипене в горната част на силно натоварените горивни касети. Според изследвания, концентрирането на борна киселина в порите на тези отлагания се дължи на локални хидротермични условия и високи топлинни потоци. Макар да няма единна хипотеза за точния механизъм на натрупване, се счита, че и химични реакции (напр. образуване на слаборазтворими съединения като $LiBO_2$ или Ni_2FeBO_5), и физични процеси като адсорбция играят роля.

4 АНАЛИЗ НА ПРОБЛЕМА СЪС СТАЦИОНАРНИТЕ ОТКЛОНЕНИЯ НА АО

За да се анализира проблема с АО, бяха използвани реални профили, на енергоотделянето, измерени и използвани в [17]. Получените точки бяха интерполирани с полиноми от 4-та степен и представени графично съответно на фиг. 2 a)-c). Интерполираните полиноми са представени в изрази (10)-(12). Получените полиноми генерират изходни криви

за пресмятанията при които се определя изменението на температурата на топлоносителя при стационарен режим на работа на реакторната установка с ВВЕР-1000. Аксиалните профили на фиг. 2 характеризират три избрани състояния. a) Аксиално разпределение на мощността в началото на 15-та кампания на 5 блок (11еф.ден.) в касета №4 за 1-ва година в активната зона; b) Аксиално разпределение на мощността в началото на 15-та кампания на 5 блок (11еф.ден.) в касета №108 за 2-ра година в активната зона; c) Аксиално разпределение на мощността в началото на 14-та кампания на 5 блок (9еф.ден.) в касета №4 за 1-ва година в активната зона.

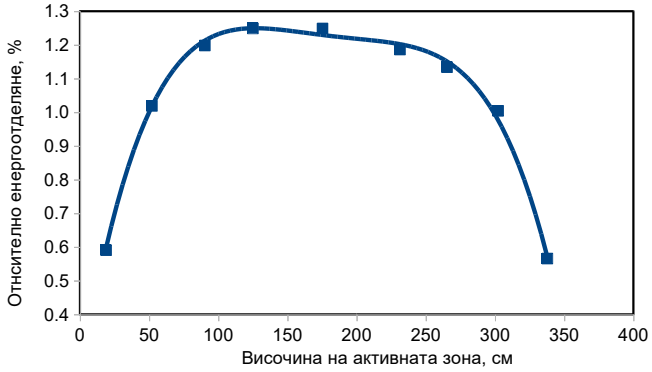
Теоретичната формула за определянето на енергоотделянето е представена в уравнение (9), но тя не може да бъде използвана за анализи свързани с АО, защото е симетрична:

$$q_l(z, r = const) = q_l(0, r = const) cos\left(\frac{\pi z}{H_e}\right) \tag{9}$$

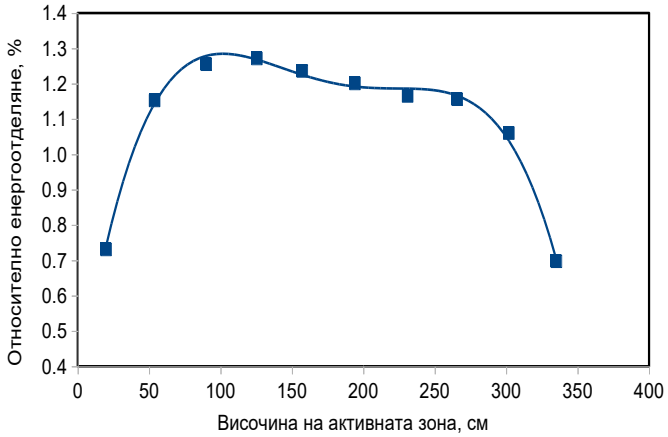
където z е координатата по височината на активната зона, m; $q_\ell(z, r=const)$ – линеен топлинен поток в точка с координата z по височина при зададен радиус, kW/m; $q_\ell(0, r=const)$ – специфичен топлинен поток в централната равнина основни кости (z=0) при даден радиус, kW/m^2 и kW/m. Началото на координатите е в центъра на активната зона и z варира от $-H_0/2$ до $H_0/2$, действителната височина на активната зона а H_e разширената височина.

Определените аксиални офсети от измерените профили са както следва: АО = 1.39% за фиг. 2-a), АО = 2.84 % за профила на на фиг. 2-b) и АО =1.70% за профила на фиг. 2-c)

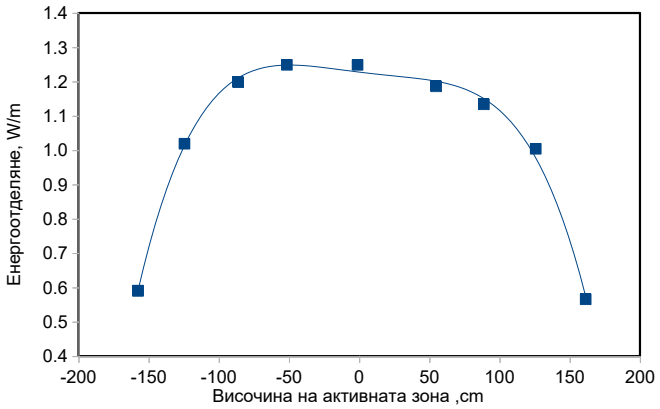
a)



b)



c)



Фигура 2. Аксиален профил на три избрани състояния. a) началото на 15-та кампания на 5 блок (11еф.ден.) в касета №4 за 1-ва година в активната зона; b) началото на 15-та кампания на 5 блок (11еф.ден.) в касета №108 за 2-ра година в активната зона; c) началото на 14-та кампания на 5 блок (9еф.ден.) в касета №4 за 1-ва година в активната зона;

Записването на r = const във формулите по-горе означава, че стойностите на специфичните топлинни потоци се изчисляват при фиксиран радиус, например за определен горивен елемент (в случай на клетка с максимално топлинно напрежение) или за определени касети, при условие че всички горивни пръти в тази горивна касета са при еднакви условия (в случай на горивни касети със средно натоварване, когато плътността на разпределението на неутронния поток върху напречното сечение на касетата е постоянна). След това ще оперираме с функция $q_\ell(z)$, като се приеме, че е изчислена за конкретна горивна касета. Тогава след интерполация с полином от 4-та степен се получава както следва от данните на фиг. 2:

$$f_1(x) = -1.087107 \times 10^{-9}x^4 + 2.4144086 \times 10^{-8}x^3 + 2.207332 \times 10^{-6}x^2 - 5.0142 \times 10^{-4}x + 1.228708403$$

(10)

където полиномът $f_1(x)$ отразява интерполацията на данните от фиг. 2-a), $R^2 = 0.996$.

$$f_2(x) = -1.280263 \times 10^{-9}x^4 + 9.390081 \times 10^{-7}x^3 - 2.45583 \times 10^{-4}x^2 + 2.6198407 \times 10^{-2}x + 0.309539673$$

(11)

където полиномът $f_2(x)$ отразява интерполацията на данните от фиг. 2-b), $R^2 = 0.995$.

$$f_3(x) = -1.087 \times 10^{-9}x^4 + 7.915541 \times 10^{-7}x^3 - 2.13747 \times 10^{-4}x^2 + 2.4882343 \times 10^{-2}x + 0.198321358$$

(12)

където полиномът $f_3(x)$ отразява интерполацията на данните от фиг. 2-c), $R^2 = 0.996$.

Максималният топлинен поток на единица повърхност на горивен елемент може да се намери по следните формули, както следва:

- за горивни касети въз основа на средно натоварване

$$q_l(0) = \overline{q_l} k_z, \text{кВт/м};$$

(13)

- за най-енергоемкия горивен елемент, касетата с максимално натоварване, като се вземат предвид местните и техническите коефициенти на неравномерност:

$$q_l(0) = \overline{q_l} k_v k_k k_{\text{тех}}, \text{кВт/м};$$

(14)

За целите на последващия анализ, е прието касета със средно натоварване, $k_z = 1.25$.

4.1 Теоретичен модел за връзката между енергоотделянето и водохимичния режим на първи контур

Промяната в средната специфична енталпия на топлоносител по дължината на канала (максимално напрегната клетка или средно натоварване ТОК) се определя от израза

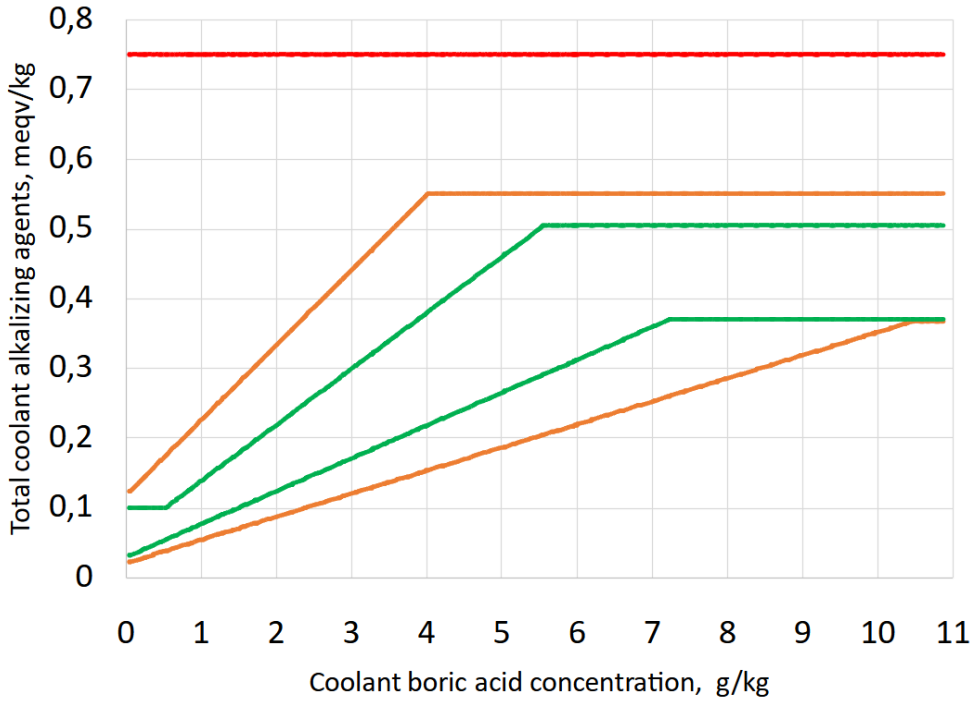
$$h_T(z) = h_{bx} + \int_{-H_o/2}^{z} \frac{n_{\text{тв}}^{\text{твс}}}{G_{\text{твс}}} q_l(z)dz;$$

(15)

където $h_т(z)$ – топлосъдържание на охлаждащият флуид в координатна точка z във височина, kJ/kg; $G_{ТВС}$– поток на топлоносител през разглежданата касета, kg/s. [15]

Поддържането на химичния режим на толоносителя в първи контура за ВВЕР-1000 е важен елемент за безопасността. Промяната на експлоатационните химични граници може да доведе до нарушение на обвивката на горивото и граничните структури на първи контур. Полагането на гориво UO_2 с по-висока концентрация на ^{235}U, води до по-висока реактивност в активната зона ВВЕР-1000 в началото на енергийния цикъл. Балансирането на първоначалната реактивност се проследява с погълнатите неутрони. Водещата водохимия на ВВЕР, която се основава на борна киселина е калиева основа. Общата алкалност, която балансира киселинността на средата се определя от калий, литий и натрий, където преднамерено се дозира само натрий. Опималното pH се получава поради балансирането на съединенията в топлоносителя, [16].

В топлоносителя в първи контур се образуват шест борсъдържащи съединения Това са $B(OH)_3$ (борна киселина); $B(OH)_4$ (тетрахидроборат); $B_2(OH)_7$ (септахидрокси диборат); $B_3(OH)_{10}$ (декахидрокси триборат); $B_4(OH)_{14}$ (тетрадекахидрокси тетраборат); $B_5(OH)_{18}$ (октадекахидрокси пентаборат). Те са представени в дипломната работа на Никол Борисова като B_{10}, B_{11}, B_{21}, B_{31}, B_{12}, B_{53} и се описват с обща формула $B_x(OH)_{3x}^{+y-}$, [16].



Фигура 3. Водо-химичен режим на първи контур в АЕЦ с ВВЕР 1000, [16].

Във водата на I-ви контур калиевият хидроксид (KOH), напълно се дисоциира, докато борната киселина се дисоциира частично и установява в равновесие с с нейните боратни полиборатни аниони в присъствието на хидроксилен анион, [16]:

$$(OH^-)=K_w/(H^+)=10^{(\log Kw+ pH)} \quad (16)$$

Равновесните реакции са както следва, [16]:

$$B(OH)_3 + OH^- \leftrightarrow B(OH)_4 \quad (17)$$

$$2B(OH)_3 + OH^- = B_2(OH)_7 \quad (18)$$

$$3B(OH)_3 + OH^- = B_3(OH)_{10} \quad (19)$$

$$4B(OH)_3 + 2OH^- = B_4(OH)_{14}^{-2}$$

(20)

$$5B(OH)_3 + 3OH^- = B_5(OH)_{18}^{-3}$$

(21)

Обобщеното уравнение може да се представи така, [16] .

$$x\ B(OH)_3 + y\ OH^- = B_x(OH)_{3x+y}^{-y}$$

(21)

където x показва броя на борната киселина, а y показва количеството отрицателни заряди в боратните аниони. Константите на дисоциация K_{xy} са определени по стандартни формули за всяко борсъдържащо съединение, [16]. Елементите на „xy" означават вид на компоунда, който се дисоциира, [16]:

$$logK_{11} = \frac{1573.21}{T} + 28.8397 + 0.011748T - 13.2258logT$$

(22)

$$logK_{21} = \frac{2756.1}{T} - 18.966 + 5.835logT$$

(23)

$$logK_{31} = \frac{3339.5}{T} - 8.084 + 1.497logT$$

(24)

$$logK_{42} = \frac{12820}{T} - 134.56 + 42.105logT$$

(25)

$$logK_{53}\ 14099/T - 138.115 + 36.237logT$$

(26)

Тези изрази са в диапазона от 25° до 300°C.

Относно баланса на масата е електрическата неутралност са получени следните уравнения, [16] :

$$Бор= (B(OH)^{4-}+ 2(B_2(OH)^{7-}) + (B_3(OH)^{10-})+4(B_4(OH)_{14}^{-2})+5(B_5(OH)_{18}^{-3})$$

(27)

$$Бор= K_{11}(B(OH)_3)\ (OH^-) + 2K^{21}(B(OH)_3)2(OH^-)+3K_{31}(B(OH)_3)^3(OH^-)_9+4K_{42}$$

$$(B(OH)_3)^4(OH^-)^{2+} 5K_{53}(B(OH)_3)^5(OH^-)$$

(28)

Чрез решаването на полином от пети ред може да се получи концентрация на борната киселина и другите концентрации на борсъдържащи съединения могат да бъдат изчислени с помощта на техните уравнения за равновесното отношения. Практически, тази задача е решена чрез използване на метода на Нютон-Рафсон в разработения код. Впоследствие концентрацията на калия, необходим за контрол на pH, може да се изчисли със следните уравнения, [16] :

$$(Калий)_{пресметнато}= K_{11}\ (B(OH)_3)\ (OH^-) +K_{21}\ (\ B(OH)_3)^2(OH^-)+\ K_{31}(B(OH)_3)^3(OH^-) + 2\ K_{42}\ (B(OH)_3)^4\ (OH^-)^2 + 3\ K_{53}(B(OH)_3)^5(OH^-)^3$$

(30)

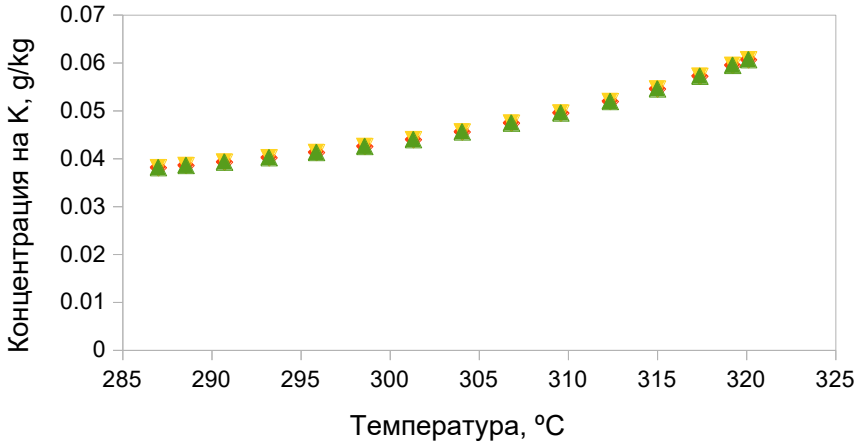
За направата на анализа, беше използвана програма, разработена, верифицирана и валидирана за целите на дипломна работа [16] входни данни, показани в таблица 2.

Параметър	Стойности	Пояснения
numbfa	163	Брой касети в реактора
numbfr	312	Брой топлоотделящи елементи в ТОЕ
pres_inp	156	Налягане в първи контур, bars
temp_inp	560.15	Тепературa на вход в активната зона, K

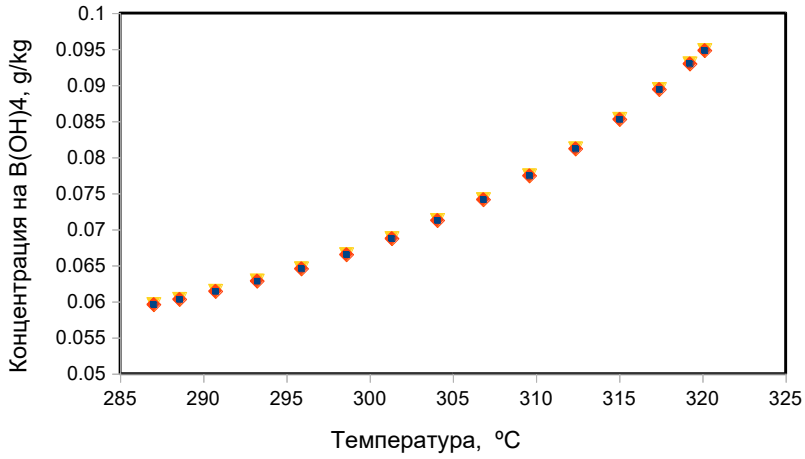
pres_circ	156	Налягане в първи контур, bars
temp_circ	560.15	Температура на изход от кативната зона (за справка), K
reac_flowrate	89500	Разход през активната зона, m^3/h
pows	3083.0E6	Мощност, Wt
bconc	5	Концентрация на борна киселина, g/kg
cl	3.55	m, височина на активната зона
nfp	numbfa*numbfr	Брой горивни елементи
Ammonia	5.5	Концентрация на амоняк
pH	Определя се да поддържа съотношение около 7.4 при 300 ºC и да остава таква при други температури	
alk_met	K	Концентрация на алкални метали

Таблица 2. Входни данни от програмата

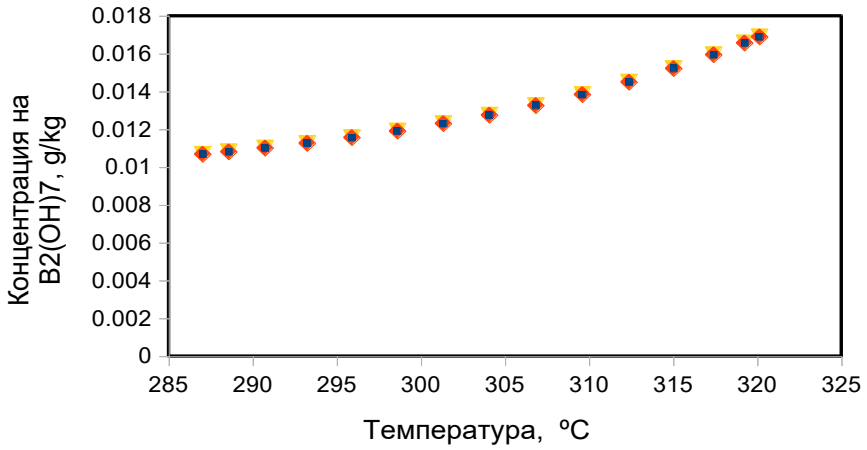
Изчисленията са направени с две програми. Едната програма е използваната, от [16], а другата програма е направена за настоящата дипломна работа посредством Python. С първата програма се определи температурния профил по височината на активната зона на база получените полиноми (10)-(12) . С втората се програма се определи и промяната на концентрацията на компонентите на борна киселина. Резултатите от пресмятанията са показани на фиг. 4-10.



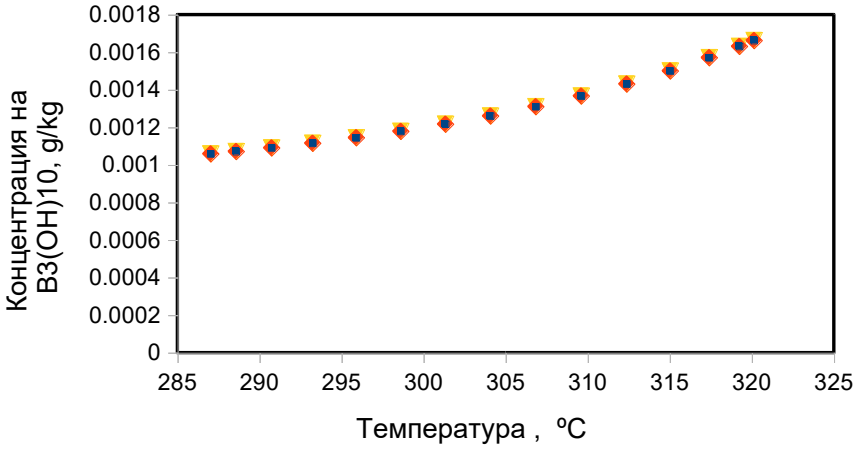
Фигура 4. **Изменение на концентрацията на K в g/kg , спрямо температура на средата.**



Фигура 5. **Изменението на концентрацията на $B(OH)_4$ в g/kg, спрямо температура на средата.**

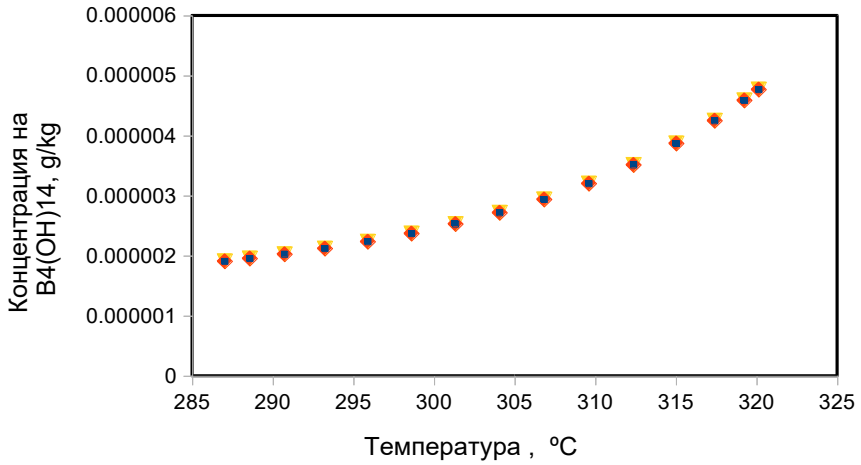


Фигура 6. **Изменението на концентрацията на $B_2(OH)_7$ в g/kg, спрямо температура на**

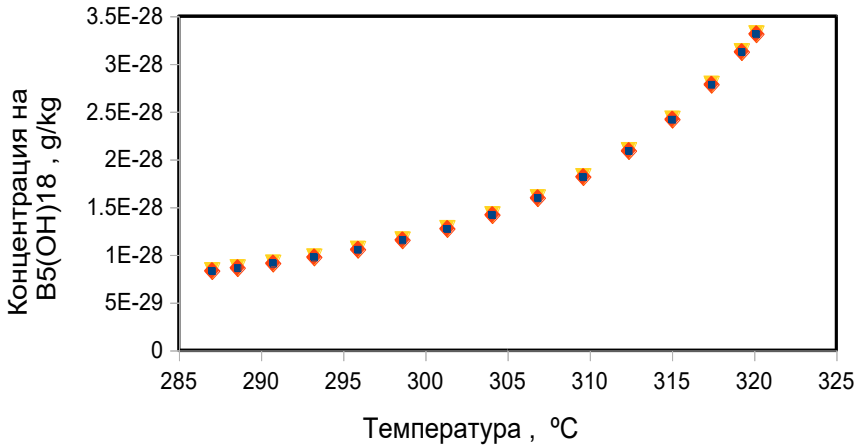


средата.

Фигура 7. **Изменението на концентрацията на $B_3(OH)_{10}$ в g/kg, спрямо температура на средата.**

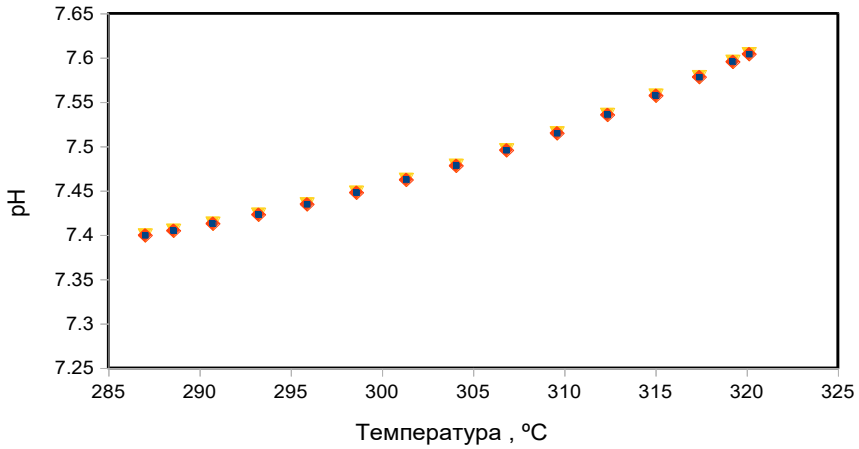


Фигура 8. Изменението на концентрацията на $B_4(OH)_{14}$ в g/kg, спрямо температура на



средата.

Фигура 9. Изменението на концентрацията на $B_5(OH)_{18}$ в g/kg, спрямо температура на средата.



Фигура 10. **Изменението на pH , спрямо температура на средата.**

На фиг. 4 се вижда , че концентрацията на K нараства g/kg . На фигура 5 се вижда, че концентрацията на $B(OH)_4$ нараства g/kg. На фигура 6 се вижда, че концентрацията на $B_2(OH)_7$ нараства g/kg . На фигура 7 се вижда, че концентрацията на $B_3(OH)_{10}$ нараства g/kg. На фигура 8 се вижда, че концентрацията на $B_4(OH)_{14}$ нараства g/kg. На фигура 9 се вижда, че концентрацията на $B_5(OH)_{18}$ нараства g/kg. На фигура 10 се вижда изменението на pH спрямо температурата. pH се променя и в резултат на това средата става киселинна. След като алкалността ни е еднаква не се очаква концентрацията на алкални метали да се променя. Проследява се, че се променя , което се дължи на константите на дисоциация на борната киселина, които при различни температури показват различна дисоциация. В резултат на това алкалните метали показват необходимостта да се вкара в системата допълнително алкален метал под формата на калиева основа , за да се компенсира киселинността в следствие на тази дисоциация и pH да се запази такова каквото е било в началото при ниските температура. В следствие на този процес на компенсация , при компонентите на борната киселина има повече компоненти с по-високи валентности. По-високите валентности водят до повече борни атоми , което означава, че поглъщащите свойства на средата се подобряват. В резултат на този процес би могла да възникне АОА в неутронния поток.

Методиката предполага, че индикатор за измение на алкалността на средата е концентрацията на калий, нарастването показва, че има понижаване на pH в реални условия, което е резултат от появата на компоненти с повече борни атоми в тях.

5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пресмятанията показват, че действително повишената температура в активната зона на ядрените реактори би могла да допринесе за възникване на АО поради увеличаването на концентрацията на компоненти с повече борни атоми в тях. Тъй като обаче температурната разлика в активната зона на ВВЕР-1000 не е значима то тяхното влияние е незначително и не би могло да допринесе към въздействие върху реактивността в ядрения реактор от тип ВВЕР-1000. За останалите видове реактори от тип водо-воден, би следвало да се разгледа всеки специфичен случай. Като бъдеща задача остава възможността да се оцени влиянието на разтворените продукти на корозия в топлоносителя на първи контур.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Sawicki, J. (2000). *Axial offset anomaly: Coupling PWR primary chemistry with core design*. Nuclear Engineering and Design, 202(3), 245–258.

[2] Jack N. Donohew, Senior Project Manager, NRR INITIAL FOLLOWUP OF CALLAWAY AXIAL OFFSET ANOMALY (AOA) DURING OPERATING CYCLE 10 (TAC NO. MA4458), NRC 2001

[3] Pelykh, S.N. Cladding rupture life control methods for a power-cycling WWER-1000 nuclear unit / S.N. Pelykh, M.V. Maksimov // Nuclear Engineering and Design. — 2011. — Vol. 241, Issue 8— PP. 2956 — 2963.

[4] Тодорцев, Ю.К. Автоматизированная система регулирования мощности энергоблока для управления ЯЭУ в маневренных режимах с постоянной температурой входа в реактор / Ю.К. Тодорцев, Т.А. Цисельская, М.В. Никольский / Ядерна та радіаційна безпека. — 2013. — Вип. 4(60). — С. 20 — 25.

[5] Пат. 100070 Україна, МПК G21C 7/00. Спосіб управління ядерною енергетичною установкою з реактором водяного типу при зміні потужності реактора або зовнішнього навантаження / Максимов М.В., Баскаков В.Е, Пелих С.М., Цисельська Т.О.; заявник та патентовласник Максимов М.В., Баскаков В.Е, Пелих С.М., Цисельська Т.О. – № a201102326; заявл. 28.02.2011; надр. 12.11.2012, Бюл. № 21

[6] Nikolsky, M.V., 2015. Axial offset as measure of stability of light water nuclear reactor during capacity maneuvering. *Automation of Technological and Business Processes*, 6(4), pp.65–72.

[7] Nuclear Power Plant Krško, Technical Specifications

[8] PCT-05-529, Axial Offset Validity Criteria for Westinghouse Reload Safety Analysis Methodology, Nuclear Design Plant Operating Data Predictions, and Power Distribution Measurements including W(z) Factors and Fxy(z) Limits, Revision 3, June 30, 2005

[9] WCAP-9272-P-A, Westinghouse Reload Safety Evaluation Methodology, July 1985.

[10] WCAP-9773, An Engineering User's Guide to Flux Maps and Flux Mapping, August, 1980

[11] INCORE-3D, Incore-3D User Manual, October 9, 1997

[12] WCAP-12472-P-A, BEACON Core Monitoring and Support System, August 1994

[13] WCAP- 16312-P, Revision 0, The Nuclear Design and Core Management of the Krško Nuclear Power Plant Cycle 21, August 2004

[14] WCAP-16575-P, Revision 0, The Nuclear Design and Core Management of the Krško Nuclear Power Plant Cycle 22, April 2006

[15] Пламен Петков, Лекции по топлотехника, Ядрена техника и ядрена енергетика, Увод в ядрената топлотехника, СУ „Св. Климент Охридски“,зимен семестър 2024/2025

[16] Никол Борисова, Изследване на течни капилярни мостове и тяхното влияние върху повърхностните свойства на топлоносителя на ядрени реактори с ВВЕР, Дипломна работа, СУ „Св. Климент Охридски“, 2022г.

[17] Красимир Каменов, Анализ на влиянието на изгарянето на родия върху показанията на неутронните детектори от СВРК, Дипломна работа, СУ „Св. Климент Охридски“, 2009