



Софийски университет „Св. Климент Охридски“

Физически факултет

Специалност Ядрена техника и ядрена енергетика

Дебора Володиева Митева

**Контрол за непопадане на странични предмети в
технологично оборудване от системи важни за
безопасността в ЯЕЦ и анализ на последствията при
попадането им**

Дипломна работа за придобиване на образователно-
квалификационна степен „бакалавър“

Научен ръководител:

Р-л група „КНСП“ Дилян Бориславов Митев
„АЕЦ Козлодуй“ ЕАД

Научен консултант:

доц. д-р Пламен Весков Петков

Съдържание

1	Въведение.....	3
2	Цели и задачи на дипломната работа	4
3	Теоретична част	5
3.1	Фундаментални функции за безопасност и определение за страничен предмет.....	5
3.2	Системите важни за безопасността (СВБ).....	7
3.3	Проактивни и реактивни мерки за КНСП.....	8
3.4	Обособяване на зони със „Специален режим“	9
3.5	Дефиниране и определяне на нивото на риск от странични предмети.....	10
3.6	Система за детекция на мигриращи тела (KUS),	10
3.7	Свойства на касетите за предотвратяване на попадане на странични предмети в топлохидравличен канал в първи контур	12
4	Топлохидравлично пресмятане	14
4.1	Методика на пресмятанията	14
4.2	Теоретични основи.....	15
4.2.1	Топлохидравлични пресмятания за максимално натоварен канал	15
4.2.2	Топлохидравлични пресмятания за средно натоварен канал	20
4.3	Изходни данни за топлохидравлично пресмятане	24
4.4	Определяне на топлохидравличните параметри по височина на АкЗ за максимално и средно натоварен канал	27
5	Заключение.....	31
	Литература	34

Списък на Фигурите

Фигура 3.1 Схематично представяне на мерките за непопадане на странични предмети в първи контур	8
Фигура 3.2 Блок схема на системата KUS, [4].....	12
Фигура 3.3 3D изображение на антидебризен филтър за ВВЕР-1000, [6]	13
Фигура 4.1 Елементарна клетка, [7]	14
Фигура 4.2 Температура на изход от активната зона за различни разходи на топлоносителя: а) максимално натоварен канал, б) средно натоварен канал.....	27
Фигура 4.3 Изменение на температура на външната стена на обвивката на ТОЕ по височина на АкЗ за различни разходи на топлоносителя: а) максимално натоварен канал, б) средно натоварен канал	28
Фигура 4.4 Изменение на температура на вътрешната стена на ТОЕ по височина на АкЗ за различни разходи на топлоносителя: а) максимално натоварен канал, б) средно натоварен канал	29
Фигура 4.5 Изменение на температурата на повърхността на урановата таблетка по височина на АкЗ за различни разходи на топлоносителя: а) максимално натоварен канал, б) средно натоварен канал	29
Фигура 4.5 Изменение на температурата в центъра на урановата таблетка по височина на АкЗ за различни разходи на топлоносителя: а) максимално натоварен канал, б) средно натоварен канал	30

Списък на Таблиците

Таблица 3.1 Функции на безопасност и системи свързани с тях върху, който имат влияние попадналите странични предмети в първи контур.	6
Таблица 4.1 Общи характеристики на активната зона.....	24
Таблица 4.2 Характеристики на активната зона.....	25
Таблица 4.3 Характеристики на топлоотделящите елементи	26
Таблица 4.4 Свойства на топлоносителя на линията на насищане	26

1 Въведение

Наличието на странични предмети в технологично оборудване принадлежащо към системите важни за безопасността представлява сериозен риск за ядрената, радиационната и експлоатационната безопасност.

В редица международни доклади от организации като МААЕ [1], са регистрирани реални инциденти, при които попадане на чужди предмети е довело до спиране на енергийни блокове, повреди на оборудване и необходимост от извънредни ремонти. Всичко това налага въвеждането и поддържането на система за контрол за непопадане на странични предмети (FME – Foreign Material Exclusion). Такава система не само намалява вероятността от технически инциденти, но и подпомага поддържането на висока култура на безопасност в ядрените енергийни съоръжения.

FME контролът е насочен към предотвратяване на събития, свързани с проникване на чужди предмети. Чрез прилагане на програма за управление и ясни процедури, се гарантират надеждната и безопасна работа на ядрените централи. Международната агенция за атомна енергия (МААЕ) започва практика, с която да обменя експлоатационен опит между страните членки, поради все още съществуващите случаи, свързани с попадане на странични предмети. В тази връзка МААЕ предлага насоки и добри практики за ефективно решаване на проблема.

В настоящата дипломна работа се разглежда същественото значение на контрола за непопадане на странични предмети (КНСП) в технологичното оборудване от системи важни за безопасността (СВБ) в ЯЕЦ. Страничните предмети могат да доведат до нежелани последствия за безопасната експлоатация на централата – включително продължителни и непланирани ремонти, повишено радиационно облъчване на персонала и неконтролируемо изхвърляне на радиоактивни вещества в околната среда.

Теоретичният преглед на FME подходите, в дипломната работа е нагледно представен с пресмятане на въздействието върху топлообмена в активната зона при частично запушване на проходното сечение на топлоносителя вследствие на попаднал страничен предмет. В дипломната работа са разгледани и показани графично, и таблично измененията на температурите по височина на активната зона на един топлоотделящ елемент (ТОЕ) при различни състояния. В настоящата работа е коментирано явлението криза на топлообмена и връзката му с радиационната безопасност на ядрената електроцентрала.

2 Цели и задачи на дипломната работа

Основната цел на всички мерки за непопадане на странични предмети в системите важни за безопасността (СВБ) е да се предотврати попадането на такива тела в горивните касети. В резултат на такова попадане се блокира потока на топлоносителя, който охлажда ТОЕ. Вследствие на намаленото охлаждане, температурата на горивото се покачва и може да достигне стойности, които да доведат до повреда. Затова настоящата дипломна работа цели да се направи обзор на средствата, с които разполага реакторната установка, за да се предотврати попадане на такова тяло. Ако въпреки наличните мерки такова тяло е попаднало е направен опростен анализ, за да покаже как това би повлияло на температурата на горивото.

Целите поставени пред дипломната работа включват следните елементи:

- Да се запознае дипломанта с технологията и условията за непопадане на чужди предмети в първи контур с реакторна установка ВВЕР – 1000. Да се разгледат мерките, които се вземат за непопадане на такива тела в активната зона на ядрения реактор.
- Да се направи оценка доколко е опасно попадането на такива тела в един топлохидравличен канал, формиран около ТОЕ.
- Да се направят съответни изводи относно важността на управление на мерките за непопадане на странични предмети в първи контур на ВВЕР-1000.

За да се докаже тезата за голямата опасност от страничните тела върху нормалната работа на реакторната установка, са разгледани три разхода през топлохидравличен канал около ТОЕ: номинален $G_1 = 0,325 \text{ kg/s}$ и два редуцирани $G_2 = 0,282 \text{ kg/s}$ и $G_3 = 0,233 \text{ kg/s}$. Това съответства на абсолютна промяна на разхода, $\Delta G_1 = 0,043 \text{ kg/s}$ и $\Delta G_2 = 0,092 \text{ kg/s}$. Относителното отклонение от номиналния разход е както следва: $\delta G_1 = 13,2 \%$ и $\delta G_2 = 28,3 \%$.

3 Теоретична част

3.1 Фундаментални функции за безопасност и определение за страничен предмет

При извършване на техническо обслужване и ремонт (ТОиР) или монтаж на оборудване, свързани с разуплътняване, съществува потенциална опасност от попадане на странични предмети в оборудването. Ненавременното им откриване и отстраняване може да доведе до сериозни отклонения в работата на системите, да създаде риск за безопасната експлоатация и да доведе до значителни материални щети за дружеството.

Целта е да се предотвратят нарушения в сигурната и надеждна работа на технологичните системи. Затова се въвеждат допълнителни технически и организационни мерки. Те включват ясно регламентирани изисквания, отговорности и организация на дейностите, които следва да бъдат стриктно спазвани от добре обучен персонал на АЕЦ, както и от служители на външни организации.

В ядрената енергетика понятието „**страничен предмет**“ се използва за предмет или част от него – елемент, компонент, вещество, инструмент, материал, опаковка, средства за индивидуална защита и др., които са попаднали или имат потенциална възможност да попаднат във вътрешната част на оборудването или технологичната система, и не са част от тях, съгласно документацията на това оборудване, [1]. Като страничен предмет дефинираме и елемент, който е част от дадено оборудване, но монтиран на позиция, несъответстваща на заводската документация, или който не съответства по размер или състав. Пример за такива предмети могат да бъдат крепежни елементи, гарнитури, уплътняващи пръстени, част от работно колело, шпонки и други, [1]. Страничен предмет е също попадането на работна среда (например машинно масло, разтвор, киселини, основи) от една технологична система в друга чрез отворено за ремонт оборудване. Към тази категория спадат също продуктите на корозия или отлагания във вътрешните части на оборудването, [1]. Попадането на чист кондензат неконтролирано в топлоносителя е свързан с една от фундаменталните функции за безопасност разгледани по-долу и също може да се разглежда като страничен предмет. За недопускане попадането на чист кондензат по време на ТОиР в топлоносителя при стоянъчна концентрация на $H_3BO_3 \geq 16 \text{ g/l}$ се въвеждат мерки за ядрена безопасност (МЯБ).

Анализ на реални събития, [1] показва тенденция към зачестяване на определени грешки, създаващи условия за попадане на странични предмети. Възникват значителни рискове, тъй като наличието на страничните предмети може да застраши изпълнението на основните функции за безопасност на ядрената централа. Идеята за контрол на странични предмети, която предлага МААЕ е тя да започне от самото проектиране на ядрената централа и да продължи през всички етапи, включително съхранението на отработено ядрено гориво. Настоящата дипломна работа описва контрола по време на експлоатацията на ядреното съоръжение.

Съгласно изискванията на МААЕ, високо ниво на безопасност се постига при изпълнение на три основни функции на безопасност - Таблица 3.1. Тези функции представляват основата на проектни решения, експлоатационни мерки, като тяхното изпълнение е задължително за гарантиране на ядрената безопасност през жизнения цикъл на съоръжението. В Таблица 3.1 са представени основните функции на безопасност и примерни системи и оборудване, които осигуряват тяхното реализиране и предотвратяват последиците от попадане на странични предмети.

Таблица 3.1 Функции на безопасност и системи свързани с тях върху, който имат влияние попадналите странични предмети в първи контур.

Функции на безопасност	Описание	Примерни системи и оборудване
Контрол на реактивността	Поддържане на реактора в подкритично/критично състояние при всички условия и предотвратяване на неконтролируема верижна реакция.	- Система АЗ (Аварийна защита) - Система за регулиране и управление на мощността
Отвеждане на енергоотделянето	Непрекъснато отвеждане на топлина от активната зона както при нормална експлоатация, така и след спиране на реактора.	- Непрекъснатата циркулация през АкЗ - Система за аварийно охлаждане на АкЗ (САОЗ)
Неразпространение на радиоактивни вещества	Задържане на радиоактивните материали в проектните им бариери и предотвратяване на неконтролируемо изпускане в околната среда.	- Горивна таблетка - Обвивка на ТОЕ - Граници на I-ви контур - Границите на херметичната обвивка

Безопасността на ЯЦ се осигурява чрез последователно прилагане на концепцията на дълбоко ешелонираната защита, [2]. Изгражда се многослойна система от мерки за безопасност, така че ако едната мярка откаже, следващата да я компенсира и ако възникне инцидент, неговото развитие да бъде задържано или смекчено на различни нива. Целта е да се осигури висока надеждност чрез резервиране и независимост.

3.2 Системите важни за безопасността (СВБ)

Подразделят се на системи за безопасност (СБ) и системи за нормална експлоатация, важни за безопасността (СНЕВБ). Системите за безопасност биват защитни, локализиращи, обезпечавачи и управляващи, [3]. Всяка от системите има собствено предназначение и осигурява защита на населението и персонала от външно и вътрешно облъчване, предпазва околната среда от замърсяване с радиоактивни вещества, [3]:

- Защитни – Предназначени са за предотвратяване или ограничаване повреждането на ядреното гориво, обвивките на топлоотделящите елементи и компонентите, съдържащи радиоактивни вещества (Системи за аварийно и планово охлаждане чрез дозиране на борен разтвор - TQ2,TQ3,TQ4, YT - хидроаккумулятори);
- Локализиращи – Предотвратяват или ограничават разпространението на отделящи се при аварии радиоактивни вещества и йонизиращи лъчения извън предвидените в проекта граници и попадането им в околната среда (TQ1);
- Обезпечавачи (осигуряващи) – Снабдява системите за безопасност с енергия, работен флуид и създава условия за тяхното функциониране. (Дизел - генератори);
- Управляващи – Предназначени за задействане на системите за безопасност, осъществяване на техния контрол и управление в процеса на изпълнение на зададените функции. (Система за управление и защита - СУЗ);

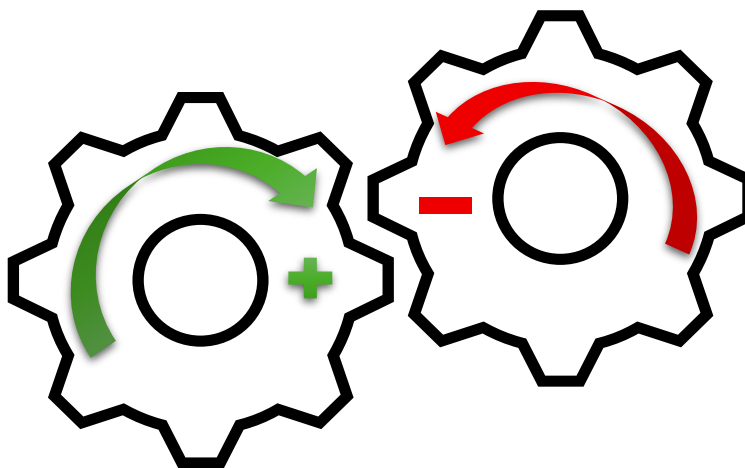
Приета е структурата от три напълно независими канала на системите за безопасност. Всеки канал е достатъчен да обезпечи радиационната и ядрената безопасност на ЯЕЦ във всички режими на нейната работа, като притежава самостоятелни механизми за контрол, сигнализация и управление. Каналите нямат общи допирни точки - нито в технологична, нито в електрическа, нито в управляваща част, което изключва възможността за откази.

Системите за нормална експлоатация, важни за безопасността включват основното оборудване на първи контур, като реактора (заедно с принадлежащото му

оборудване – вътрешнокорпусни устройства (ВКУ), горен блок, корпус, активна зона), главни циркуляционни тръбопроводи (ГЦТ), главни циркуляционни помпи (ГЦП), парогенератори (ПГ) и компенсатор на налягането (КН).

3.3 Проактивни и реактивни мерки за КНСП

Всички мерки, в област контрол непопадане на странични предмети по време на техническо обслужване и ремонт или монтаж на оборудване свързани с разуплътняване, (отваряне, разхерметизиране) се подразделят на мерки „до“ попадане на страничен предмет (проактивни) и мерки „след“ попадане на страничен предмет (реактивни). Проактивните и реактивните дейности, включват комплекс от организационни и технически мерки, като структурирането на мерките е показано в ПРИЛОЖЕНИЕ А.



Фигура 3.1 Схематично представяне на мерките за непопадане на странични предмети в първи контур

Това е базов принцип заложен при организиране на дейности за КНСП в ЯЕЦ. Целта е да се намалят случаите на нарушения на изискванията и случаите на попадане на страничен предмет до възможно най-ниски нива и напълно елиминиране на случаите на затваряне и предаването в експлоатация след техническо обслужване и ремонт с наличие на страничен предмет в него.

При увеличаване броя и ефективността на организационните и технически мерки „до“, се намаляват количеството предприемани организационни и технически мерки „след“.

3.4 Обособяване на зони със „Специален режим“

При ТОиР и монтаж на оборудване свързани с разуплътняване задължително се обособяват зони със „Специален режим“. Работното място трябва да се подготви и да се поддържа реда при изпълнение на ремонтни дейности. Зоните със „Специален режим“ са специфичен начин за организация и контрол при изпълнение на техническо обслужване и ремонт на оборудване, свързани с разуплътняване, при които се предприемат мерки за непопадане на странични предмети във вътрешните пространства на оборудването.

Въведени са изисквания за зони със „Специален режим“ на контрол:

1. Поставяне на табели или знаци, обозначаващи зони със „Специален режим“ (ПРИЛОЖЕНИЕ В);
2. Пространствено оградена чрез преградни средства (сигнална преградна лента, пана и др.). Входът и изходът трябва да бъде само един по възможност;

Зоната остава обособена докато системата или оборудването не бъдат сглобени (затворени).

3. Регистриране на внесени и изнесени материали и инструменти и въвеждане на правила за персонал, който може да влиза в тези зони;

В зона „Специален режим“ могат да се внасят само предмети, които ще бъдат използвани и те се изваждат веднага щом вече не са необходими. За да се контролира процеса е нужно воденето на списък „Внесени артикули“, който се проверява и след завършване на дейностите. В обособените зони е разрешено влизането единствено на квалифициран персонал утвърден от главен инженер.

4. Редовно почистване и проверка целостта на всички инструменти и материали;

Методи за регистриране, записване на влизащи и излизащи инструменти (всички инструменти, материали, оборудване и компоненти да бъдат проверени за движещи се, хлабави, счупени или липсващи части преди допускането им до зона „Специален режим“).

3.5 Дефиниране и определяне на нивото на риск от странични предмети

Контролът върху странични предмети се осъществява в зависимост от създавания риск и значението му за безопасността. Пример за високорискова дейност е всяка работа, която пряко или косвено може да повлияе на целостта на горивото. Страничните предмети могат механично да перфорират обвивката отвън и да намалят или блокират потока на топлоносителя в горивните канали, което води до неравномерно охлаждане, неравномерно термично съпротивление на горивните елементи и последващо увреждане на обвивките отвътре. Възниква и намаляване на ефективността на топлообмена чрез отлагане върху повърхността на обвивката.

В ПРИЛОЖЕНИЕ С е представен примерен подход за класифициране на риск от странични предмети, базиран на четиристепен модел за управление. Всяка ЯЕЦ може да адаптира контрола, отчитайки вероятността от възникване на събития и тежестта на последиците при конкретна дейност. Независимо от броя на избраните нива на риск, при оценката (ПРИЛОЖЕНИЕ С) са взети предвид следните въпроси:

- Каква е вероятността за попадане на страничен предмет?
- До каква степен е възможно въздействие върху ядрената безопасност?
- Можем ли да контролираме риска?
- Значимо ли е конкретното действие или система за ядрената безопасност?

При разработването на подобен подход следва да се отчита и факторът, свързан с възможността и сложността при откриване и отстраняване на страничен предмет след неговото попадане в система или оборудване. Тази функция се изпълнява от системата за откриване на мигриращи тела (KUS).

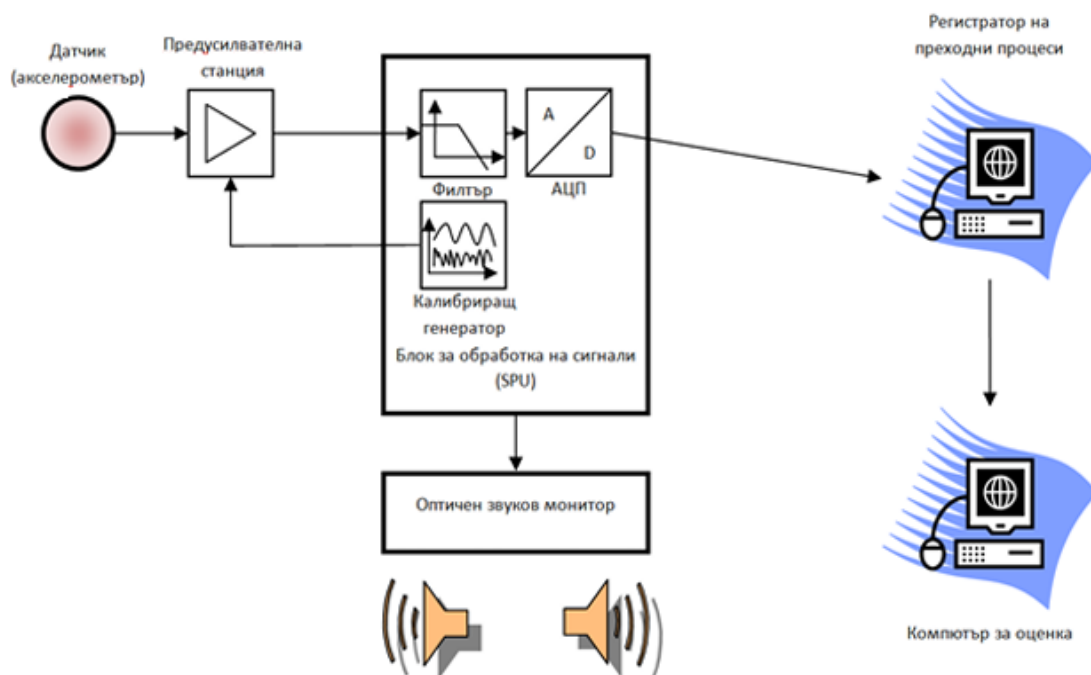
3.6 Система за детекция на мигриращи тела (KUS)

В случай на вече попаднали странични тела в първи контур, е предвидена система за ограничаване на тяхната миграция както и тяхното ранно откриване. Това е системата за детекция на мигриращи тела, KUS. С цел локализиране на мигриращите тела, системата следи нивата на шум в първи контур по време на експлоатация, [4]. Принципът на работа се базира на факта, че телата в потока на топлоносителя предизвикват структурни шумове, които влияят върху стените на оборудването. Тези шумове могат да бъдат измерени чрез подходящи сензори и подложени на анализ чрез специализиран

софтуер. KUS наблюдава амплитудата на шумовите сигнали в зададен честотен диапазон, като всяко отклонение от предварително зададените гранични стойности се отчита като потенциално наличие на такова тяло. В този случай системата записва сигналите в зададен времеви интервал. Събраните данни се обработват цифрово, което позволява както съхранение на информация, така и последваща оценка на причините и последствията от наблюдавания сигнал, [4].

Системата KUS използва 19 на брой пиезOMETрични акселерометри, които са разположени върху външните метални повърхности на основното оборудване на първи контур. На дъното на ректора са разположени 3 броя датчика съответно на 90° , 140° и 260° . Останалите 16 броя са разпределени по 4 на горещ щуцер на реактора, горещ щуцер на парогенератора, щуцер на подхранваща вода на парогенератор и главни циркулационни помпи, [4].

Фигура 3.2 изобразява блок схема на системата, която включва акселерометър за детектиране на шум и последваща предусилвателна станция, която преобразува сигнала. Преобразуваният вече аналогов сигнал се подава в блока за обработка на сигнали (SPU). Там преминава през филтрация от нискочестотни и лентови филтри, и чрез аналогово-цифров преобразувател се конвертира в цифров сигнал. Предава се на регистратор на преходни процеси и обработващия компютър. Оптичния звуков монитор служи на оператора за прослушване в реално време на аналоговия шум, създаден от датчика и за визуално изобразяване на стойността на входните сигнали чрез светодиодна стълбица. Системният софтуер (KUS) успява да разпознае признаци на често срещани събития, прави оценка на събитието в зависимост от неговата значимост, извежда 2D и 3D графики и предлага множество специализирани функции и действия, [4].

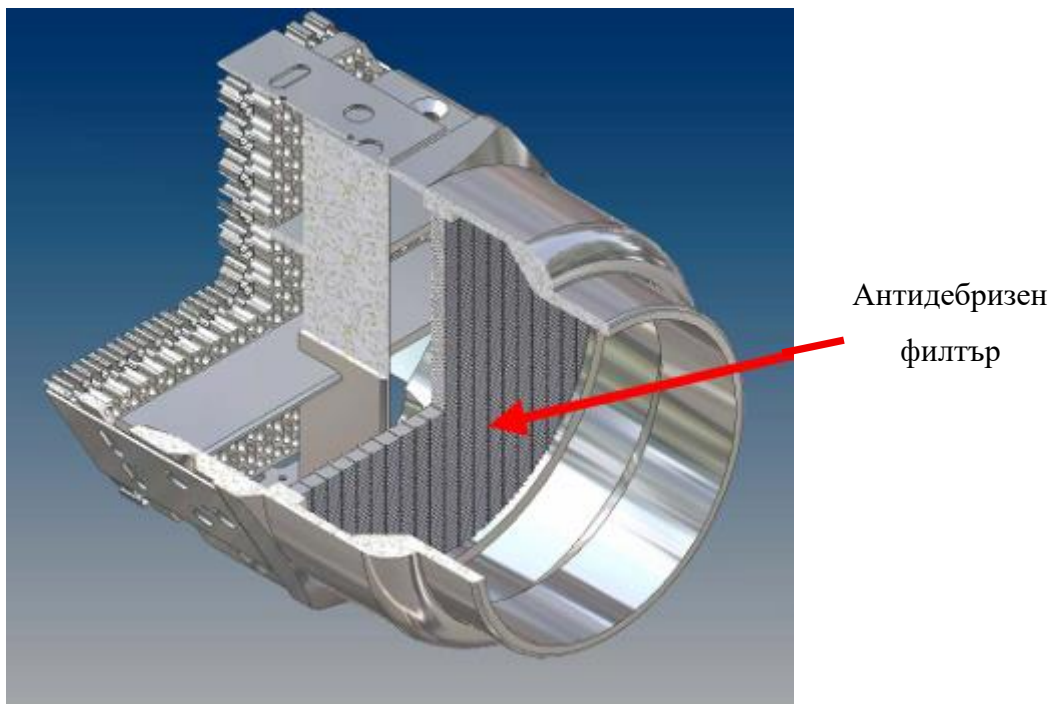


Фигура 3.2 Блок схема на системата KUS, [4]

3.7 Свойства на касетите за предотвратяване на попадане на странични предмети в топлохидравличен канал в първи контур

Антидебризните филтри представляват решетки, които предотвратяват навлизането на чужди предмети в активната зона на реактора и по точно в горивните касети. Те пропускат охлаждащ реагент, но задържат метални стружки, фрагменти от корозия и други малки твърди вещества, [5].

Целта на антидебризните филтри е предпазване от разгерметизация на горивните елементи, причинена от попадане на страничен предмет. Контактът със странични предмети може да доведе до разрушаване на обвивката на горивото и освобождаване на радиоактивни вещества в I - ви контур. Делът на повредите на горивото е вторият по големина след корозията. Антидебризните филтри се монтират в долната част на горивните касети, [5].



Фигура 3.3 3D изображение на антидебризен филтър за ВВЕР-1000, [6]

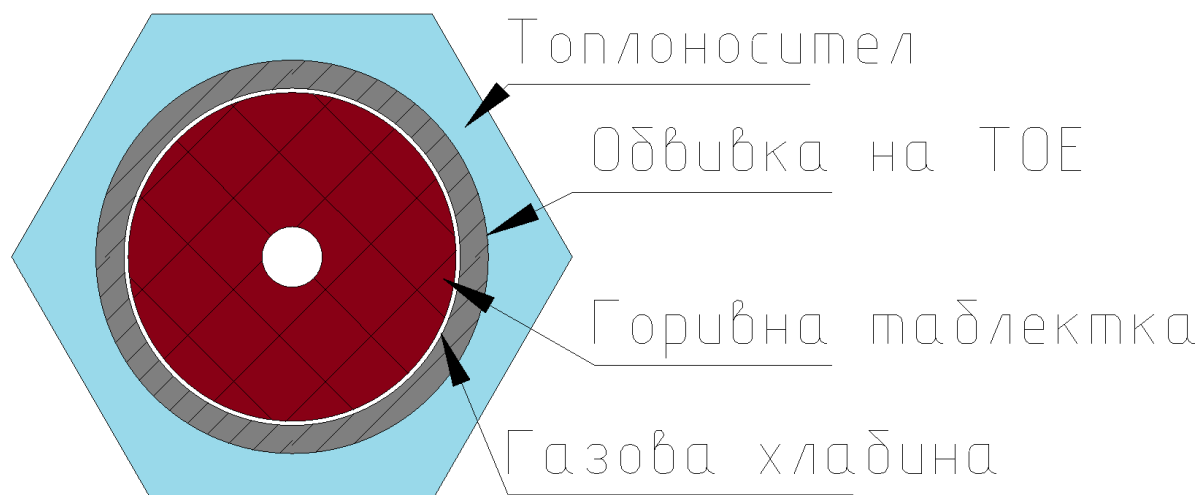
4 Топлохидравлично пресмятане

Активната зона на реактори тип ВВЕР-1000 е проектирана така, че получената топлина, в резултат на делене ядрата на горивото, да бъде ефективно изведена. В противен случай, това представлява пречка за нормалната експлоатация на ядреното съоръжение.

При попадане на страничен предмет в АкЗ възниква риск от нарушаване целостта на една от функциите на безопасност а именно – отвеждане на енергоотделянето. За количествена оценка и анализ при такъв случай, е нужно топлохидравлично пресмятане, проведено по-долу.

4.1 Методика на пресмятанията

Съществува проверочно и конструкторско топлохидравлично пресмятане, като задачата на проверочното пресмятане се свежда до определяне на основните топлотехнически параметри при известно конструктивно оформяне на реактора, [7]. Именно част от такова пресмятане се разглежда в настоящата работа. На Фигура 4.1, се разглежда елементарна клетка на горивната касета, ТОЕ, заедно със забавителя (топлоносителя) около него. Движението на топлоносителя е турбулентно, а топлоотделяне по височина на канала е симетрично.



Фигура 4.1 Елементарна клетка, [8]

Методиката включва следните компоненти:

1. Избор за пресмятане по височина на единичен канал, със средно енергоотделяне на активната зона и повтаряне на пресмятането за канал с максимално енергоотделяне
2. Намаляване на разхода топлоносителя през канала, като се симулира частичното му запусване със следните относителни стойности: $\delta G_1 = 13,2 \%$ и $\delta G_2 = 28,3 \%$.
3. Определяне на температурите на топлоносителя, обвивката на ТОЕ и горивната таблетка по височина на канала за двата избрани случая за еднофазен топлоносител.
4. Сравняване на получените резултати по отношение на близостта на максималната температура на топлоносителя до температурата на насищане за на средата.

4.2 Теоретични основи

4.2.1 Топлохидравлични пресмятания за максимално натоварен канал

4.2.1.1 Температурата на топлоносителя по височина на канала

Температурата на топлоносителя по височина на канала в едномерно приближение без отчитане на топлообмена по височина се определя по формулата, [9]:

$$T_T(z) = T_{\text{вх}} + \int_{-\frac{H}{2}}^z \frac{q_l(z')}{G \cdot C_p} dz' \quad (1)$$

Където: $T_{\text{вх}}$ – температура на топлоносителя на вход в АкЗ, $^{\circ}\text{C}$; z – точка от височината на АкЗ, $[m]$; H – височина на АкЗ, $[m]$; $q_l(z')$ – топлинният поток на единица дължина – линейен топлинен поток, $[W/m]$; G – разход на топлоносител средно през един ТОЕ, $[kg/s]$; C_p – среден относителен коефициент на топлемкост на водата в АкЗ, $[J/kg^{\circ}\text{C}]$; При симетрично енергоотделяне линейният топлинен поток се изменя по закон близък до косинусовият т.е.:

$$q_l(z') = q_{l0} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H}\right) \quad (2)$$

Където: z – точка от височината на АкЗ, $[m]$; H – височина на АкЗ, $[m]$; q_{l0} – линейният топлинен поток в централната плоскост на АкЗ и за най-натовареният канал е q_{l0max} $[W/m]$:

$$q_{l0max} = \frac{Q_{\text{топ}} \cdot k_v}{H \cdot N \cdot n_{\text{ТОЕ}}} \quad (3)$$

Където: $Q_{\text{топ}}$ – топлинна мощност на реактора, $[W]$; k_v – коефициент на обемна неравномерност на енергоотделянето; H – височина на АкЗ, $[m]$; N – брой топлоотделящи касети; $n_{\text{ТОЕ}}$ – брой ТОЕ;

Разхода на топлоносител средно през един ТОЕ, G $[kg/s]$:

$$G = \frac{Q_{\text{топ}}}{C_p \cdot \Delta T \cdot N \cdot n_{\text{ТОЕ}}} \quad (4)$$

Където: $Q_{\text{топ}}$ – топлинна мощност на реактора, $[W]$; C_p – среден относителен коефициент на топлемост на водата в АкЗ, $[J/kg^\circ C]$; ΔT – средно подгряване на топлоносителя в АкЗ, $[^\circ C]$; N – брой топлоотделящи касети; $n_{\text{ТОЕ}}$ – брой ТОЕ;

Температурата по височина z на активната зона, се определя по формулата:

$$T_T(z) = T_{\text{вх}} + \int_{-\frac{H}{2}}^z \frac{\left[q_{l0max} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z'}{H}\right) \right]}{(G \cdot C_p)} dz' \quad (5)$$

Където: $T_{\text{вх}}$ – температура на топлоносителя на вход в АкЗ, $[^\circ C]$; z – точка от височината на АкЗ, $[m]$; H – височина на АкЗ, $[m]$; q_{l0max} – линейният топлинен поток в централната плоскост на АкЗ за най-натовареният канал, $[W/m]$; G – разход на топлоносител средно през един ТОЕ, $[kg/s]$; C_p – среден относителен коефициент на топлемост на водата в АкЗ, $[J/kg^\circ C]$;

За пресмятане на уравнение (5) се използва всяко поредно z , което отговаря на точка от височината на активната зона.

4.2.1.2 Температура на външната стена на обвивката на ТОЕ

Температурата на външната стена на обвивката на ТОЕ, $T_{обв}$ се пресмята по следната формула, [9]:

$$T_{обв} = T_T(z) + \Delta T_{\alpha z} \quad (6)$$

Където: $T_T(z)$ – температурата на топлоносителя, [°C]; $\Delta T_{\alpha z}$ – температурната разлика между топлоносителя и повърхността на ТОЕ, [°C];

$$\Delta T_{\alpha z} = \frac{q_{l0max} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H}\right)}{P_{топл} \cdot \alpha_{max}} \quad (7)$$

Където: $\Delta T_{\alpha z}$ – температурната разлика между топлоносителя и повърхността на ТОЕ, [°C]; q_{l0max} – линейният топлинен поток в централната плоскост на АкЗ за най-натовареният канал, [W/m]; z – точка от височината на АкЗ, [m]; H – височина на АкЗ, [m]; $P_{топл}$ – топлинния периметър на ТОЕ, [m]; α_{max} – коефициент на топлоотдаване за максимално натоварен канал, [W/m²K];

$$T_{обв}(z) = \left[\left[T_{вх} + \int_{-\frac{H}{2}}^z \frac{q_{l0max} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z'}{H}\right)}{(G \cdot C_p)} dz' \right] + \left[\frac{q_{l0max} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H}\right)}{P_{топл} \cdot \alpha_{max}} \right] \right] \quad (8)$$

Където: $T_{обв}(z)$ – температурата на външната стена на обвивката на ТОЕ, [°C]; $T_{вх}$ – температура на топлоносителя на вход в АкЗ, [°C]; z – точка от височината на АкЗ, [m]; H – височина на АкЗ, [m]; q_{l0max} – линейният топлинен поток в централната плоскост на АкЗ за най-натовареният канал, [W/m]; G – разход на топлоносител средно през един ТОЕ, [kg/s]; C_p – среден относителен коефициент на топлемкост на водата в АкЗ, [J/kg°C]; $P_{топл}$ – топлинния периметър на ТОЕ, [m]; α_{max} – коефициент на топлоотдаване за максимално натоварен канал, [W/m²K];

Температурата на обвивката на ТОЕ се изменя по височина на АкЗ по по-сложен закон, от колкото температурата на топлоносителя по височина на АкЗ, при това максималната температура на обвивката, която ни интересува е на по-малка височина (в

пределите на Ак3) от колкото височината, при която температурата на топлоносителя има максимално значение, [9].

4.2.1.3 Температура на вътрешната стена на обвивката на ТОЕ

Температура на вътрешната стена на обвивката на ТОЕ, $T_v(z)$ се изчислява с формулата, [9]:

$$T_v(z) = T_{обв}(z) + \frac{(1-\chi) \cdot q_l(z') \cdot \delta_{об}}{\pi \cdot d_{об} \cdot \lambda_{об}} \quad (9)$$

Където: $T_{обв}(z)$ – температурата на външната стена на обвивката на ТОЕ, [°C]; $q_l(z')$ – топлинният поток на единица дължина – линейен топлинен поток, [W/m]; $(1 - \chi)$ – коефициент отчитащ каква част от енергията се отделя в конструкционния материал. Приемам, че 0,92 т.е. 92% от енергията на делене се освобождава в горивото или, [9]:

$$\chi = 0,92 \quad (10)$$

Следователно, в конструкционния материал се освобождава следния дял от генерираната енергия:

$$(1 - \chi) = 0,08 \quad (11)$$

$d_{об}$ – дебелина на обвивката, [m]; $\delta_{об}$ – среден диаметър $(d_3 + d_2)/2$, [m]; $\lambda_{об}$ – топлопроводност на циркониевата сплав, [W/m. K];

$$T_v(z) = \left[T_{вх} + \int_{-\frac{H}{2}}^z \frac{q_{l0max} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z'}{H}\right)}{(G \cdot C_p)} dz' \right] + \left[\frac{q_{l0max} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H}\right)}{P_{топл} \cdot \alpha_{max}} \right] + (1 - \chi) \left[q_{l0max} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H}\right) \right] \frac{\frac{(d_3 - d_2)}{2}}{\pi \cdot \frac{d_3 + d_2}{2} \cdot \lambda_{об}} \quad (12)$$

Където: $T_v(z)$ – температура на вътрешната стена на обвивката на ТОЕ, [°C]; $T_{вх}$ – температура на топлоносителя на вход в Ак3, [°C]; z – точка от височината на Ак3, [m]; H – височина на Ак3, [m]; q_{l0max} – линейният топлинен поток в централната плоскост на Ак3 за най-натоварения канал, [W/m]; G – разход на топлоносител средно през един ТОЕ, [kg/s]; C_p – среден относителен коефициент на топлемкост на водата в Ак3, [J/kg°C]; $P_{топл}$ – топлинния периметър на ТОЕ, [m]; α_{max} – коефициент на

топлоотдаване за максимално натоварен канал, $[W/m^2K]$; $(1 - \chi)$ се дава с уравнение (11); d_2 – вътрешен диаметър на обвивката на ТОЕ, $[m]$; d_3 – външен диаметър на обвивката на ТОЕ, $[m]$;

4.2.1.4 Температурата на повърхността на урановата таблетка

Температурата на повърхността на урановата таблетка, $T_{ks}(z)$ се пресмята по следната формула, [9]:

$$T_{ks}(z) = T_v(z) + \frac{\chi \left[q_{l0max} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H}\right) \right]}{\pi \cdot d_1 \cdot \alpha_{ks}} \quad (13)$$

Където: $T_v(z)$ – температура на вътрешната стена на обвивката на ТОЕ, $[^\circ C]$; q_{l0max} – линейният топлинен поток в централната плоскост на АкЗ за най-натовареният канал, $[W/m]$; z – точка от височината на АкЗ, $[m]$; H – височина на АкЗ, $[m]$; d_1 – външен диаметър на горивната таблетка, $[m]$; α_{ks} – Коефициент на топлоотдаване между горивото и контактния слой, $[W/m^2K]$; χ се дава с уравнение (10).

4.2.1.5 Температурата в центъра на урановата таблетка

Температурата в центъра на урановата таблетка, $T_{cen}(z)$ се пресмята по следната формула, [9]:

$$T_{cen}(z) = T_{ks}(z) + \frac{\chi \left[q_{l0max} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H}\right) \right]}{4\pi \cdot \lambda_U \left[1 - \frac{2(d_0)^2}{(d_1)^2 - (d_0)^2} \cdot \ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right) \right]} \quad (14)$$

Където: $T_{ks}(z)$ – температура на вътрешната стена на обвивката на ТОЕ, $[^\circ C]$; q_{l0max} – линейният топлинен поток в централната плоскост на АкЗ за най-натовареният канал, $[W/m]$; z – точка от височината на АкЗ, $[m]$; H – височина на АкЗ, $[m]$; λ_U – Коефициент на топлопроводност на ядреното гориво, $[W/m \cdot K]$; d_0 – диаметър на централния отбор в таблетката, $[m]$; d_1 – външен диаметър на горивната таблетка, $[m]$; χ се дава с уравнение (10);

4.2.2 Топлохидравлични пресмятания за средно натоварен канал

4.2.2.1 Температурата на топлоносителя по височина на канала

Температурата на топлоносителя по височина на канала в едномерно приближение без отчитане на топлообмена по височина се определя по:

$$T_T(z) = T_{\text{вх}} + \int_{-\frac{H}{2}}^z \frac{q_l(z')}{G \cdot C_p} dz' \quad (15)$$

Където: $T_{\text{вх}}$ – температура на топлоносителя на вход в АкЗ, $[^{\circ}\text{C}]$; z – точка от височината на АкЗ, $[m]$; H – височина на АкЗ, $[m]$; $q_l(z')$ – топлинният поток на единица дължина – линейен топлинен поток, $[W/m]$; G – разход на топлоносител средно през един ТОЕ, $[kg/s]$; C_p – среден относителен коефициент на топлемост на водата в АкЗ, $[J/kg^{\circ}\text{C}]$; При симетрично енергоотделяне той се изменя по закон близък до косинусовият т.е.:

$$q_l(z') = q_{l0} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H}\right) \quad (16)$$

Където: z – точка от височината на АкЗ, $[m]$; H – височина на АкЗ, $[m]$; q_{l0} – линейният топлинен поток в централната плоскост на АкЗ и за средно натоварен канал е $q_{l0\text{ср}} [W/m]$:

$$q_{l0\text{ср}} = \frac{Q_{\text{топ}} \cdot k_z}{H \cdot N \cdot n_{\text{ТОЕ}}} \quad (17)$$

Където: $Q_{\text{топ}}$ – топлинна мощност на реактора, $[W]$; k_z – коефициент на неравномерност по височина на АкЗ; H – височина на АкЗ, $[m]$; N – брой топлоотделящи касети; $n_{\text{ТОЕ}}$ – брой ТОЕ;

Разхода на топлоносител средно през един ТОЕ, $G [kg/s]$:

$$G = \frac{Q_{\text{топ}}}{C_p \cdot \Delta T \cdot N \cdot n_{\text{ТОЕ}}} \quad (18)$$

Където: $Q_{\text{топ}}$ – топлинна мощност на реактора, $[W]$; C_p – среден относителен коефициент на топлемост на водата в АкЗ, $[J/kg^{\circ}C]$; ΔT – средно подгряване на топлоносителя в АкЗ, $[^{\circ}C]$; N – брой топлоотделящи касети; $n_{\text{ТОЕ}}$ – брой ТОЕ;

$$T_T(z) = T_{\text{вх}} + \int_{-\frac{H}{2}}^z \frac{q_{l0\text{cp}} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z'}{H}\right)}{(G \cdot C_p)} dz' \quad (19)$$

Където: $T_{\text{вх}}$ – температура на топлоносителя на вход в АкЗ, $[^{\circ}C]$; z – точка от височината на АкЗ, $[m]$; H – височина на АкЗ, $[m]$; $q_{l0\text{cp}}$ – линейният топлинен поток в централната плоскост на АкЗ за средно натоварен канал, $[W/m]$; G – разход на топлоносител средно през един ТОЕ, $[kg/s]$; C_p – среден относителен коефициент на топлемост на водата в АкЗ, $[J/kg^{\circ}C]$;

За пресмятането на уравнение (19) се използва всяко поредно z , което отговаря на точка от височината на активната зона.

4.2.2.2 Температура на външната стена на ТОЕ

Температура на външната стена на ТОЕ, $T_{\text{обв}}$ се пресмята по формулата:

$$T_{\text{обв}} = T_T(z) + \Delta T_{\alpha z} \quad (20)$$

Където: $T_T(z)$ – температурата на топлоносителя, $[^{\circ}C]$; $\Delta T_{\alpha z}$ – температурната разлика между топлоносителя и повърхността на ТОЕ, $[^{\circ}C]$;

$$\Delta T_{\alpha z} = \frac{q_{l0\text{cp}} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H}\right)}{P_{\text{топл}} \cdot \alpha_{\text{cp}}} \quad (21)$$

Където: $\Delta T_{\alpha z}$ – температурната разлика между топлоносителя и повърхността на ТОЕ, $[^{\circ}C]$; $q_{l0\text{cp}}$ – линейният топлинен поток в централната плоскост на АкЗ за най-натоварения канал, $[W/m]$; z – точка от височината на АкЗ, $[m]$; H – височина на АкЗ,

$[m]$; $P_{\text{топл}}$ – топлинния периметър на ТОЕ, $[m]$; $\alpha_{\text{ср}}$ – коефициент на топлоотдаване за средно натоварен канал, $[W/m^2K]$;

$$T_{\text{обв}}(z) = \left[T_{\text{вх}} + \int_{-\frac{H}{2}}^z \frac{q_{l0\text{ср}} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z'}{H}\right)}{(G \cdot C_p)} dz' \right] + \left[\frac{q_{l0\text{ср}} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H}\right)}{P_{\text{топл}} \cdot \alpha_{\text{ср}}} \right] \quad (22)$$

Където: $T_{\text{обв}}(z)$ – температурата на външната стена на обвивката на ТОЕ, $[^{\circ}\text{C}]$; $T_{\text{вх}}$ – температура на топлоносителя на вход в АкЗ, $[^{\circ}\text{C}]$; z – точка от височината на АкЗ, $[m]$; H – височина на АкЗ, $[m]$; $q_{l0\text{ср}}$ – линейният топлинен поток в централната плоскост на АкЗ за средно натоварен канал, $[W/m]$; G – разход на топлоносител средно през един ТОЕ, $[kg/s]$; C_p – среден относителен коефициент на топлемкост на водата в АкЗ, $[J/kg^{\circ}\text{C}]$; $P_{\text{топл}}$ – топлинния периметър на ТОЕ, $[m]$; $\alpha_{\text{ср}}$ – коефициент на топлоотдаване за средно натоварен канал, $[W/m^2K]$;

Температурата на обвивката на ТОЕ се изменя по височина на АкЗ по по-сложен закон, от колкото температурата на топлоносителя по височина на АкЗ, при това максималната температура на обвивката, която ни интересува е на по-малка височина (в пределите на АкЗ) от колкото височината, при която температурата на топлоносителя има максимално значение (на изход от АкЗ), [9].

4.2.2.3 Температура на вътрешната стена на обвивката на ТОЕ

Температура на вътрешната стена на обвивката на ТОЕ, $T_{\text{обв в\u0432\u0442}}(z)$ се пресмята по формулата:

$$T_{\text{обв в\u0432\u0442}}(z) = T_{\text{обв}}(z) + \frac{(1-\chi) \cdot q_l(z') \cdot \delta_{\text{об}}}{\pi \cdot d_{\text{об}} \cdot \lambda_{\text{об}}} \quad (23)$$

Където: $T_{\text{обв}}(z)$ – температурата на външната стена на обвивката на ТОЕ, $[^{\circ}\text{C}]$; $q_l(z')$ – топлинният поток на единица дължина – линеен топлинен поток, $[W/m]$; $(1 - \chi)$ – коефициент отчитащ каква част от енергията се отделя в конструкционния материал. Приемам, че 0,92 т.е. 92% от енергията на делене се освобождава в горивото или, [9]:

$$\chi = 0,92 \quad (24)$$

Следователно, в конструкционния материал се освобождава следния дял от генерираната енергия:

$$(1 - \chi) = 0,08 \quad (25)$$

$d_{об}$ – дебелина на обвивката, [m]; $\delta_{об}$ – среден диаметър $(d_3 + d_2)/2$, [m]; $\lambda_{об}$ – топлопроводност на циркониевата сплав, [W/m.K];

$$T_v(z) = \left[T_{вх} + \int_{-\frac{H}{2}}^z \frac{q_{l0cp} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z'}{H}\right)}{(G \cdot C_p)} dz' \right] + \left[\frac{q_{l0cp} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H}\right)}{P_{топл} \cdot \alpha_{cp}} \right] + (1 - \chi) \left[q_{l0cp} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H}\right) \right] \frac{\frac{(d_3 - d_2)}{2}}{\pi \cdot \frac{d_3 + d_2}{2} \cdot \lambda_{об}} \quad (26)$$

Където: $T_v(z)$ – температура на вътрешната стена на обвивката на ТОЕ, [°C]; $T_{вх}$ – температура на топлоносителя на вход в АкЗ, [°C]; z – точка от височината на АкЗ, [m]; H – височина на АкЗ, [m]; q_{l0cp} – линейният топлинен поток в централната плоскост на АкЗ за средно натоварен канал, [W/m]; G – разход на топлоносител средно през един ТОЕ, [kg/s]; C_p – среден относителен коефициент на топлемкост на водата в АкЗ, [J/kg°C]; $P_{топл}$ – топлинния периметър на ТОЕ, [m]; α_{cp} – коефициент на топлоотдаване за средно натоварен канал, [W/m²K]; $(1 - \chi)$ се дава с уравнение (25); d_2 – вътрешен диаметър на обвивката на ТОЕ, [m]; d_3 – външен диаметър на обвивката на ТОЕ, [m];

4.2.2.4 Пресмятане на температурата на повърхността на урановата таблетка

Температурата на повърхността на урановата таблетка, $T_{ks}(z)$ се пресмята по формулата:

$$T_{ks}(z) = T_v(z) + \frac{\chi \left[q_{l0cp} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H}\right) \right]}{\pi \cdot d_1 \cdot \alpha_{ks}} \quad (27)$$

Където: $T_v(z)$ – температура на вътрешната стена на обвивката на ТОЕ, [°C]; q_{l0cp} – линейният топлинен поток в централната плоскост на АкЗ за средно натоварен канал, [W/m]; z – точка от височината на АкЗ, [m]; H – височина на АкЗ, [m]; d_1 – външен диаметър на горивната таблетка, [m]; α_{ks} – Коефициент на топлоотдаване между горивото и контактния слой, [W/m²K]; χ се дава с уравнение (24);

4.2.2.5 Температурата в центъра на урановата таблетка

Температурата в центъра на урановата таблетка $T_{cen}(z)$ се пресмята по формулата:

$$T_{cen}(z) = T_{ks}(z) + \frac{\chi \left[q_{l0cp} \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot z}{H}\right) \right]}{4\pi \cdot \lambda_U \left[1 - \frac{2(d_0)^2}{(d_1)^2 - (d_0)^2} \cdot \ln\left(\frac{d_1}{d_0}\right) \right]} \quad (28)$$

Където: $T_{ks}(z)$ – температура на вътрешната стена на обвивката на ТОЕ, [°C]; q_{l0cp} – линейният топлинен поток в централната плоскост на АкЗ за средно натоварен канал, [W/m]; z – точка от височината на АкЗ, [m]; H – височина на АкЗ, [m]; λ_U – коефициент на топлопроводност на ядреното гориво, [W/m.K]; d_0 – диаметър на централния отбор в таблетката, [m]; d_1 – външен диаметър на горивната таблетка, [m]; χ се дава с уравнение (24);

4.3 Изходни данни за топлохидравлично пресмятане

Изходните данни за анализа на запущване канала с охлаждащия топлоносител са дадени в таблиците от Таблица 4.1 до Таблица 4.4.

Таблица 4.1 Общи характеристики на активната зона

Номер	Характеристика	Стойност	Размерност
1.	Топлинна мощност, Q	3000×10^6	W
2.	Електрическа мощност, $N_{ел}$	1000×10^6	W
3.	КПД, η	33,3	%
4.	Топлоносител и забавител	Вода под налягане	-
5.	Конструкционни материали	Сплав на основата на цирконий	-
6.	Коефициент на топлопроводност, $\lambda_{об}$	20,5	W/m.K
7.	Средно налягане в АкЗ, P	$16 \cdot 10^6$	Pa
8.	Температура на топлоносителя на вход, $t_{вх}$	290	°C

9.	Средно подгряване на топлоносителя в АкЗ, ΔT	32	$^{\circ}\text{C}$
10.	Енталпия на топлоносителя в АкЗ, i	$1285 \cdot 10^3$	J/kg
11.	Среден относителен коефициент на топлоемкост на водата в АкЗ, C_p	$5,67 \cdot 10^3$	$\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$
12.	Коефициент на обемна неравномерност на енергоотделянето, k_v	2,7	-
13.	Коефициент на неравномерност по височина на АкЗ, k_z	1,5	-
14.	Коефициент на топлоотдаване между горивото и контактния слой, α_{ks}	$2,7 \cdot 10^3$	$\text{W/m}^2\text{K}$
15.	Коефициент на топлоотдаване вода/обвивка за максимално натоварен канал, α_{max}	$37,1 \cdot 10^3$	$\text{W/m}^2\text{K}$
16.	Коефициент на топлоотдаване вода/обвивка, за средно натоварен канал приемам, α_{cp}	$35,7 \cdot 10^3$	$\text{W/m}^2\text{K}$

Таблица 4.2 Характеристики на активната зона

Номер	Характеристика	Стойност	Размерност
1.	Диаметър на активната зона, $D_{\text{АкЗ}}$	3,16	m
2.	Височина на активната зона, $H_{\text{АкЗ}}$	3,55	m
3.	Вид гориво	UO_2	-
4.	Коефициент на топлопроводност на ядреното гориво, λ_U	3,6	W/m.K
6.	Размер между центровете на ТОК, $h_{\text{кл}}$	234	mm
7.	Брой ТОЕ в една касета, $n_{\text{ТОЕ}}$	312	бр.
8.	Количество направляващи канали за ПЕЛ, ОР СУЗ в една касета n_n	18	бр.
9.	Централна тръба, $n_{\text{ц}}$	1	бр.

Таблица 4.3 Характеристики на топлоотделящите елементи

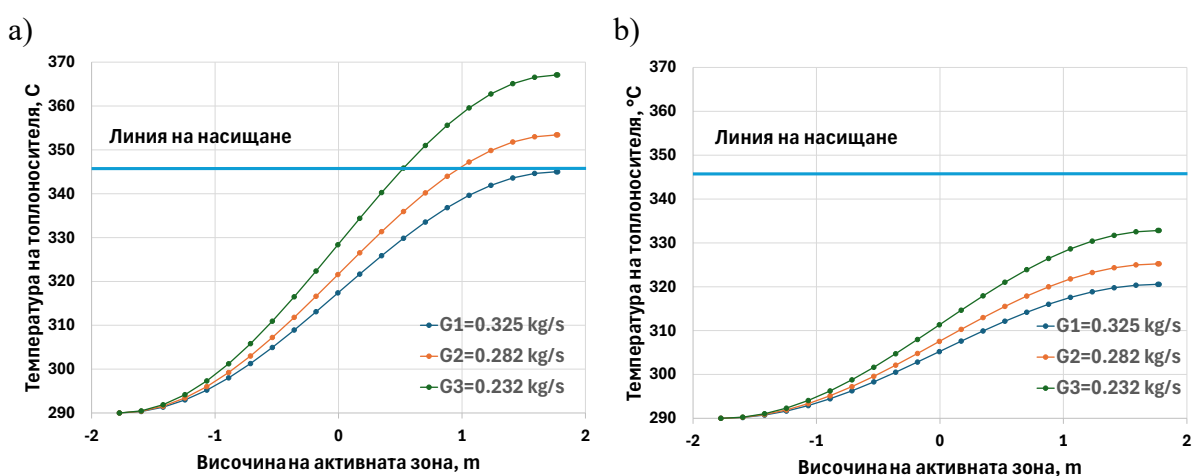
Номер	Характеристика	Стойност	Размерност
1.	Диаметър на централния отбор в таблетката, d_0	$1,4 \cdot 10^{-3}$	m
2.	Външен диаметър на горивната таблетка, d_1	$7,6 \cdot 10^{-3}$	m
3.	Вътрешен диаметър на обвивката на ТОЕ d_2	$7,8 \cdot 10^{-3}$	m
4.	Външен диаметър на обвивката на ТОЕ, d_3	$9,1 \cdot 10^{-3}$	m
5.	Диаметър на централната тръба, $d_{\text{ц}}$	$13,3 \cdot 10^{-3}$	m
6.	Диаметър на направляващите канали, $d_{\text{н}}$	$12,6 \cdot 10^{-3}$	m
7.	Брой дистанциониращи решетки по височина, $n_{\text{реш}}$	15	бр.
8.	Стъпка на решетката, s	$12,75 \cdot 10^{-3}$	m
9.	Материал на обвивката на ТОЕ	$Zr + 1\%Nb$	-
10.	Дебелина на стент на обвивката на ТОЕ, $d_{\text{ст}}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$	m
11.	Брой органи за регулиране - ОР СУЗ	61	бр.
12.	Общо количество касети N	163	бр.
13.	Топлинен периметър на ТОЕ, $P_{\text{топл}}$	$\pi \cdot d_3 = 0,029$	m

Таблица 4.4 Характеристики на топлоносителя на линията на насищане

Номер	Характеристика	Стойност	Размерност
1.	Температура, T_s	345,8	$^{\circ}\text{C}$
2.	Енталпия на водата, i_s	$1652 \cdot 10^3$	J/kg
3.	Скрита топлина на парообразуване, r	$931 \cdot 10^3$	J/kg
4.	Коефициент на повърхностно напрежение, $\sigma_{\text{нат}}$	$3,94 \cdot 10^{-3}$	N/m
5.	Число на Прандтл, Pr	1,42	-
6.	Плътност на водата, $\rho_{\text{в}}$	585	kg/m^3

4.4 Определяне на топлохидравличните параметри по височина на АкЗ за максимално и средно натоварен канал

За доказване важността на контрола за непопадане на странични тела в активната зона, се провежда числен експеримент с оценка на изменението на температурите на изход от максимално и средно натоварен канал при промяна на разхода през него в следствие на потенциално частично запусване с попадане на мигриращо тяло в него. За целта се прави обзор на теоретичния метод за пресмятанията, след което се изпълняват пресмятания с номинален разход. При намаляване на разхода проследяваме промяната на температурите на изход от активната зона. Вижда се, че нарастват.

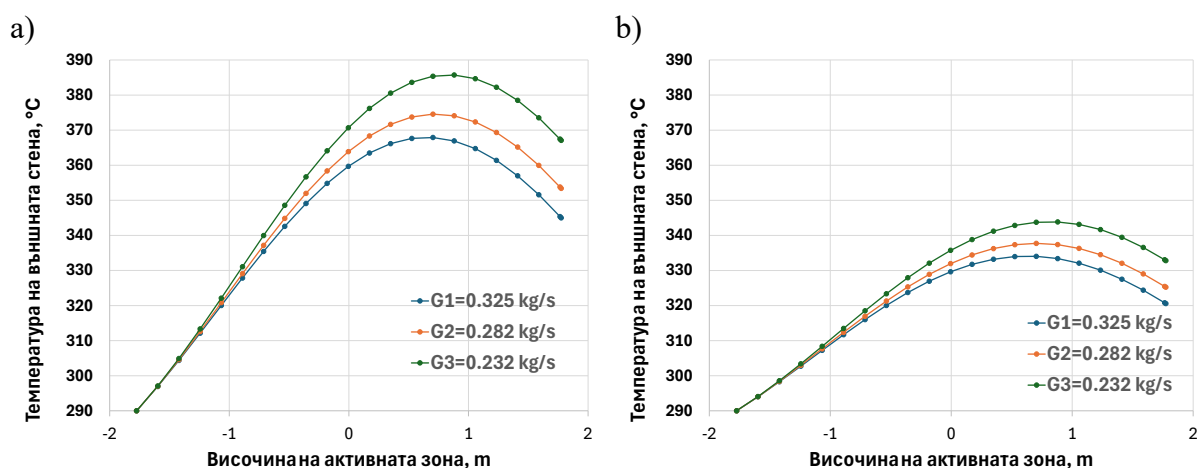


Фигура 4.2 Температура на изход от активната зона за различни разходи на топлоносителя: а) максимално натоварен канал, б) средно натоварен канал

От получените данни при $k_v = 2,7$, може да се направи извод, че на изход от най-натоварения канал е възможно да имаме кипене, както и голяма вероятност за криза на топлообмена първи род, при намален разход вследствие частично запусване при използването на теоретично определените стойности на коефициентите на неравномерност, Фигура 4.2 а). Така възникващите условия за криза на топлообмена, могат да застрашат целостта на горивото.

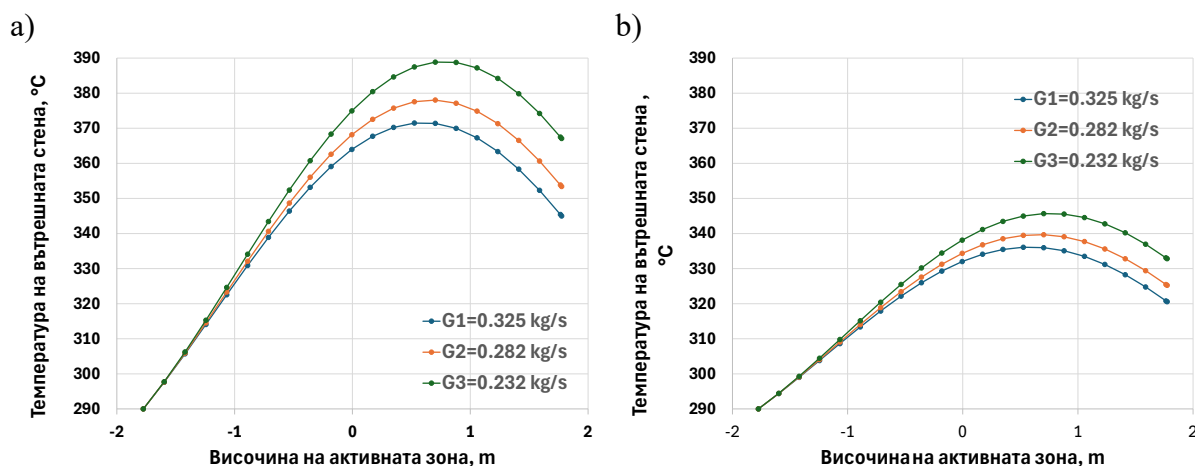
Смисълът на показаното топлохидравлични пресмятане се заключава в това да се убедим, че няма да се допусне криза на топлообмена първи род, а именно: При нагряване на топлоносителя в средно натоварения канал, Фигура 4.2 б) температурата се намира далеч под температурата на насищане и е възможно да се зараждат така наречените центрове на кипене, от които се образуват мехурчета. Тези мехурчета се отнасят от топлоносителя и в центъра на потока те кондензират. По такъв начин този процес в известен смисъл подобрява топлообмена, тъй като при граничния слой към повърхността

на ТОЕ се турбулизира. Това е така до момента, в който се наруши равенството между броят на генерираните мехурчета и броят на кондензираните мехурчета. Тогава се образува парен слой, който е и причина за рязкото понижение на коефициента на топлопредаване k поради понижаване на a_2 – коефициента на топлоотдаване между повърхността на ТОЕ и топлоносителя, при това топлинния поток q преминаващ от ТОЕ в топлоносителя също рязко ще намалее $q = \alpha \cdot \Delta T$, а генерираната в този случай енергия ще отива за повишаване температурата на горивото, а от там следва увреждане дори разтапяне на горивото, разрушаване обвивката на ТОЕ, пароциркониева реакция – разрушаване на втората бариера за безопасност съгласно принципа на дълбоко ешелонираната защита. Това би се наблюдавало в случаите с намален разход на Фигура 4.2 а).



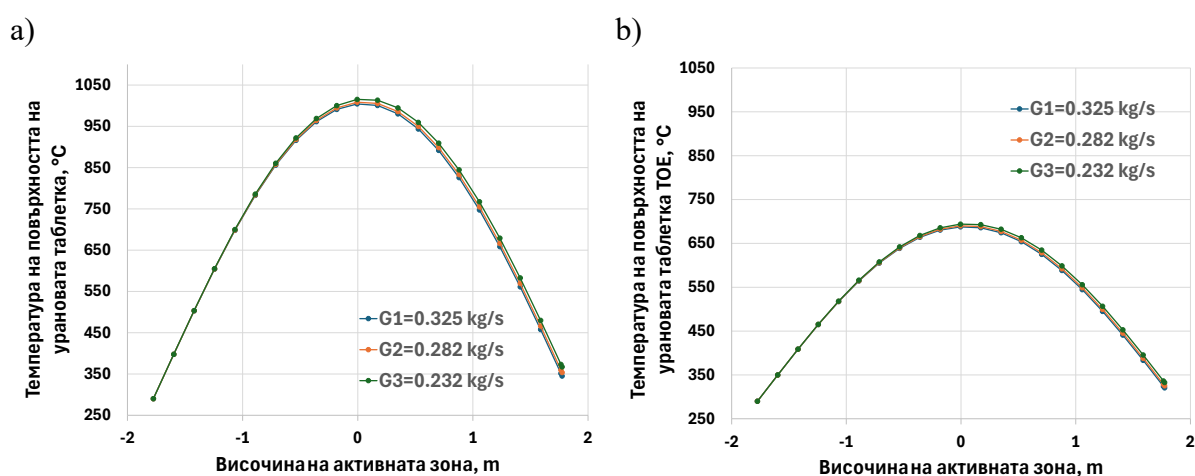
Фигура 4.3 Изменение на температура на външната стена на обвивката на ТОЕ по височина на АкЗ за различни разходи на топлоносителя: а) максимално натоварен канал, б) средно натоварен канал

На Фигура 4.3 б) се вижда, че температурите на външната стена на обвивката на ТОЕ достигат до 334°C при номинален разход на топлоносителя. При намаляване на разхода на топлоносителя се забелязва завишаване на стойностите, но температурите все още остават под 350°C за разлика от стойностите на Фигура 4.3 а).



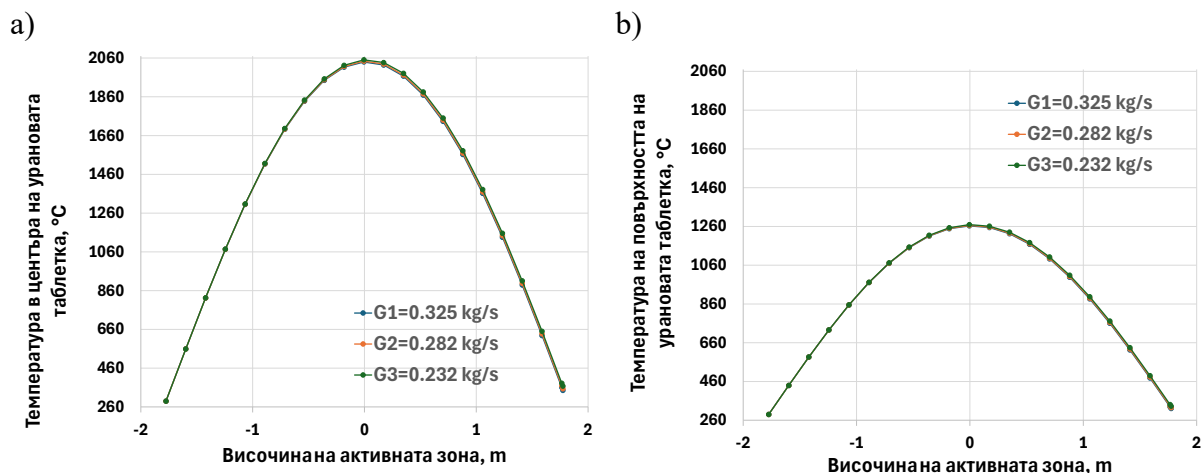
Фигура 4.4 Изменение на температура на вътрешната стена на обвивката на ТОЕ по височина на АкЗ за различни разходи на топлоносителя: а) максимално натоварен канал, б) средно натоварен канал

Температурите на вътрешната стена на обвивката на ТОЕ, както виждаме на Фигура 4.4 б), при средно натоварен канал са близки по стойност с температурите на външната стена на топлоносителя, Фигура 4.3 поради високия коефициент на топлопроводност на стената. Същото важи и за температурите на максимално натоварения канал, Фигура 4.4 а).



Фигура 4.5 Изменение на температурата на повърхността на урановата таблетка по височина на АкЗ за различни разходи на топлоносителя: а) максимално натоварен канал, б) средно натоварен канал

Температурите на повърхността на урановата таблетка не се изменят особено с промяна на разхода на топлоносител и биват получени в голям запас до поява на повреда на горивото, Фигура 4.5.



Фигура 4.6 Изменение на температурата в центъра на урановата таблетка по височина на АкЗ за различни разходи на топлоносителя: а) максимално натоварен канал, б) средно натоварен канал

Въпреки високите температури в центъра на урановата таблетка при максимално натоварен канал, Фигура 4.6 а), съществува достатъчен запас до температурата на топене на горивото $2600^{\circ}\text{C} - 2800^{\circ}\text{C}$. Получените стойности на Фигура 4.6 б) са доста по-ниски и се гарантира, че няма да имаме разтопяване.

Пресмятанията за максимално натоварен канал са представени в Таблици D1 – D5, приложение D. Пресмятанията за средно натоварен канал са представени в Таблици E1 – E5, приложение E.

5 Заключение

С цел да илюстрира до каква степен на заплаха се явява частичното запушване на канала в горивната касета и да се оцени потенциалния ефект са разгледани три случая на разход в единичен канал: номинален $G_1 = 0,325 \text{ kg/s}$ и два редуцирани $G_2 = 0,282 \text{ kg/s}$ и $G_3 = 0,233 \text{ kg/s}$. Това съответства на абсолютна промяна на разхода, $\Delta G_1 = 0,043 \text{ kg/s}$ и $\Delta G_2 = 0,092 \text{ kg/s}$ с относително отклонение от номиналния разход съответно : $\delta G_1 = 13,2 \%$ и $\delta G_2 = 28,3 \%$. При средно натоварен канал, където е прието $k_z = 1,5$, максималната температура в канала е значително по-ниска от температурата на насищане и запасите свързани с нарушаване топлообмена са достатъчно големи. Потенциално може да възникне повърхностно кипене, което подобрява топлообмена спрямо отчитания при еднофазна конвекция. Пресмятането на най-натоварения канал е направено с консервативно допускане, тъй като реално коефициентът на неравномерност k_v има много по-ниска стойност от 2,7 -не по-висока от 2, [10]. Въпреки това получения резултат е справедлив, тъй като това отива в запас. Във връзка с това се доказва, че описаните мерки за непопадане на странични предмети са важни за осигуряване на безопасната експлоатация на ядреното съоръжение. Тъй като основната цел е да се покаже опасността от засядане на мигриращи тела в единичен канал, пресмятанията са ограничени до еднофазен топлоносител.

Термини

Разуплътняване – Изменение на целостта на оборудването до състояние, в което е възможно попадане на страничен предмет в него.

Защитни средства – Покривала, защитни бариери, заглушки, тапи, капаци и др. предназначени да предотвратяват попадането на страничен предмет в отворено за ремонт оборудване. Могат да бъдат изработени от различни материали с ярък цвят без черен, сив и прозрачен.

Защитни приспособления са специфични приспособления предназначени да предотвратяват попадането на инструмент, лични предпазни средства или защитно средство в отворено за ремонт оборудване: Обезопасителни връзки за очила, химикалки, инструменти или др.; Монтирани като част от инструмент, метални рингове с диаметър по-голям от най-големия отвор, в който потенциално може да попадне даден инструмент; Контейнери или кутии за съхранение и подреждане на крепежни елементи и резервни части при демонтаж; Контейнери или кутии за съхранение на лични вещи; Други изделия, които са предназначени да предотвратяват попадането на инструмент, защитно средство или страничен предмет в отворено за ремонт оборудване.

Технически средства КНСП – Средства с помощта, на които се изпълняват част от техническите мерки на системата за КНСП. Примери за това са средства за ограждане, приспособления за съхраняване на документите, видео камери, принтери за маркиране на инструмент, четящи устройства и други.

Списък с използвани съкращения

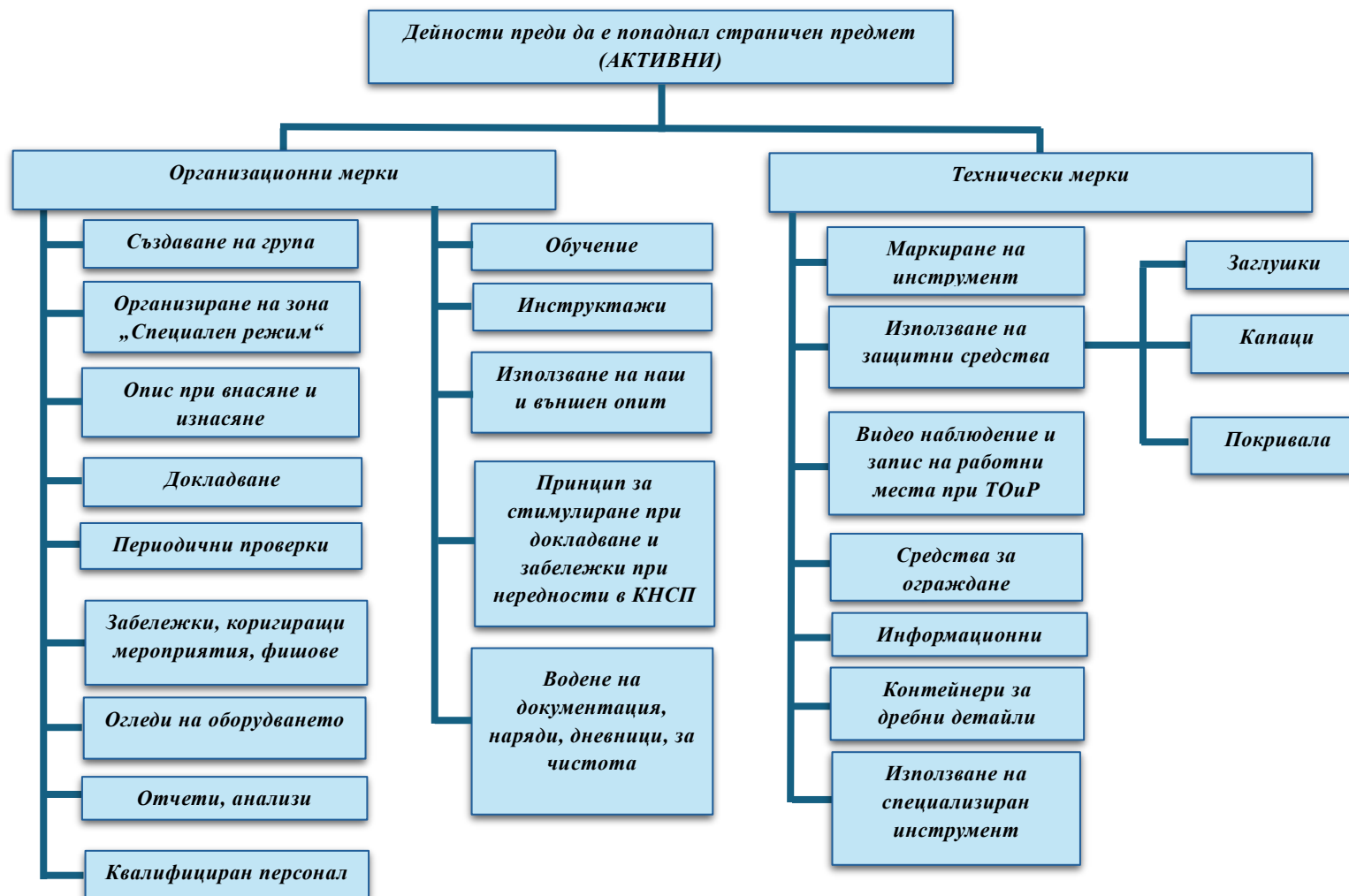
АЕЦ	Атомна електроцентрала
АЗ	Аварийна защита
АкЗ	Активна зона
ВКУ	Вътрешно-корпусни устройства
ВВЕР	Водо-воден енергиен реактор
ГЦТ	Главен циркуляционен тръбопровод
ГЦП	Главна циркуляционна помпа
КНСП	Контрола за непопадане на странични предмети
КН	Компенсатор на налягането
КПД	Коефициент на полезно действие
МААЕ	Международна агенция за атомна енергия
МЯБ	Мерки за ядрена безопасност
ОР СУЗ	Органи за регулиране от система за управление и защита
ПГ	Парогенератор
ПЕЛ	Поглъщащ елемент
СУЗ	Система за управление и защита
САОЗ	Система аварийно охлаждане на активната зона
СБ	Системи за безопасност
СВБ	Системи важни за безопасността
СНЕВБ	Системи нормална експлоатация, важни за безопасността
ТОЕ	Топлоотделящ елемент
ТОК	Топлоотделяща касета
ТОиР	Техническо обслужване и ремонт
ЯЦ	Ядрена централа
FME	Foreign Material Exclusion

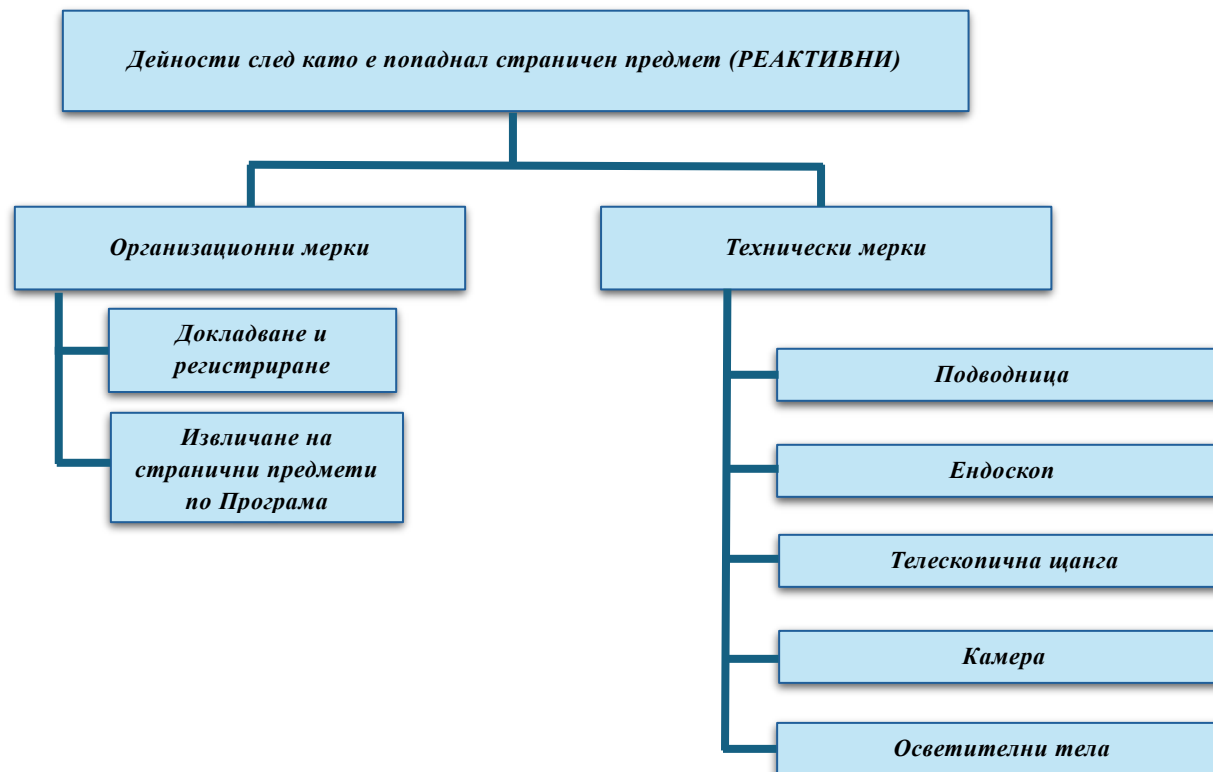
Литература

- [1] IAEA-TECDOC-1970, „ FOREIGN MATERIAL MANAGEMENT IN NUCLEAR POWER PLANTS AND PROJECTS,“ IAEA, Vienna, 2021.
- [2] „Наредба за безопасност при управление на радиоактивните отпадъци,“ *Държавен вестник*, № 76, 30 септември 2005.
- [3] АЯР, „ОТЧЕТ ЗА АНАЛИЗ НА БЕЗОПАСНОСТТА, АЕЦ “Козлодуй”, БЛОК 5 - Общо описание,“ АЯР, 2022.
- [4] А. Н. Митев, *Диагностични системи за ВВЭР-1000*, гр. София, 2018 г..
- [5] V. M. V. U. A. A. I. M. Yu. Egorov, *Experimental Research of the ADF Designs*.
- [6] V. Molchanov, *Nuclear fuel for NPPs with*.
- [7] В. Велев, *Топлофизика на ядрените реактори*, София: АТОМЕНЕНЕРГОРЕМОНТ АД и ЕНПРОКОНСУЛТ ООД, 2003.
- [8] LibreCAD, „LibreCAD,“ 2018-2024. [Онлайн]. Available: https://docs.librecad.org/en/2.2.0_a/about/index.html. [Отваряно на 25 08 2025].
- [9] N. E. Todreas и M. Kazimi, *Nuclear Systems Volume I: Thermal Hydraulic Fundamentals*, том 1, Taylor & Francis, 1989.
- [10] И. Х. Е. Вапирев, *Неутронно-физични процеси при ВВЕП-400 (В-230) и ВВЕР-1000 (В-320)*, Учебно-тренировъчен център "АЕЦ-Козлодуй".

ПРИЛОЖЕНИЕ А

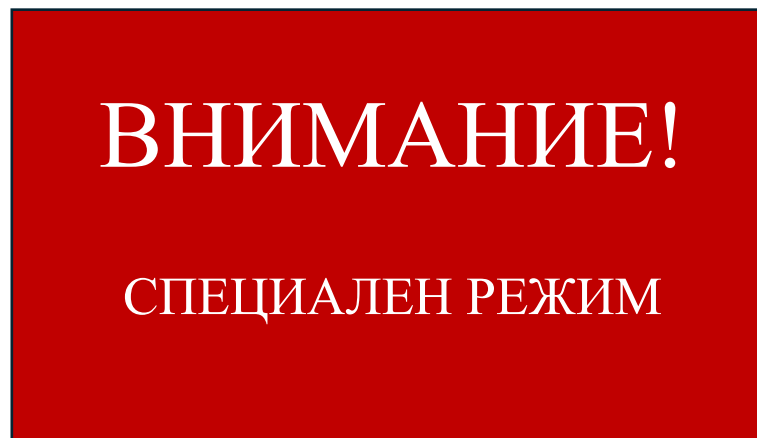
Схема на организационните и технически мерки за КНСП





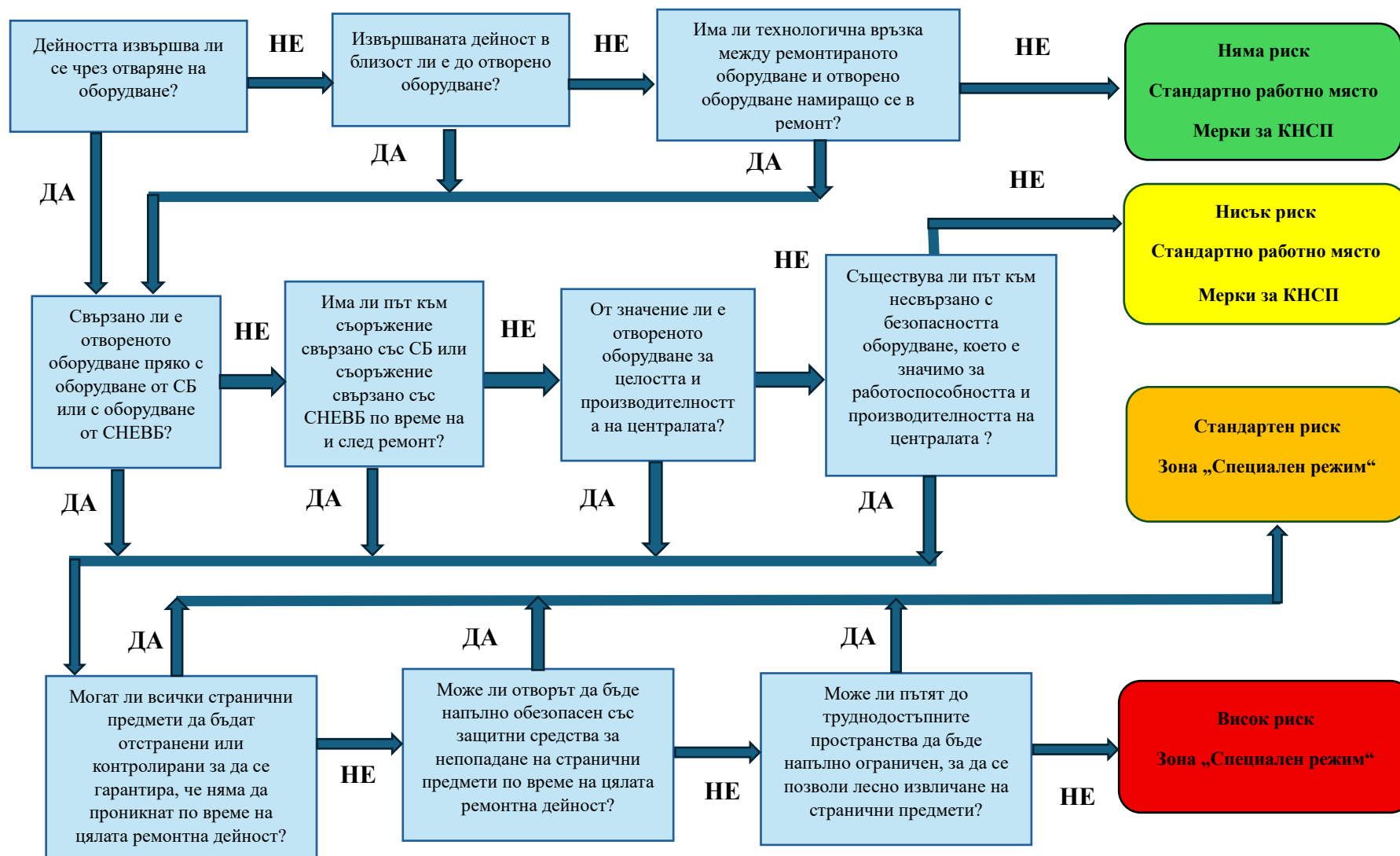
ПРИЛОЖЕНИЕ В

Предупредителна Табела – „ВНИМАНИЕ! СПЕЦИАЛЕН РЕЖИМ“



ПРИЛОЖЕНИЕ С, [1]

Анализ на риска свързан с КНСП при ТОиР или монтаж на оборудване извършвани чрез разуплътняване



ПРИЛОЖЕНИЕ D

Таблицы показващи изменението на температурите за максимално натоварен канал

Таблица D.1 Температура на топлоносителя

z [m]	T _T (z) при G ₁ [°C]	T _T (z) при G ₂ [°C]	T _T (z) при G ₃ [°C]
-1,775	290	290	290
-1,598	290,3	290,4	290,5
-1,421	291,3	291,5	291,9
-1,244	293,0	293,4	294,2
-1,067	295,2	296,0	297,3
-0,89	298,0	299,2	301,2
-0,713	301,3	303,0	305,8
-0,536	304,9	307,2	310,9
-0,359	308,9	311,8	316,5
-0,182	313,1	316,6	322,4
-0,005	317,4	321,6	328,4
0,172	321,7	326,5	334,4
0,349	325,9	331,3	340,3
0,526	329,8	335,9	345,8
0,703	333,5	340,2	351,0
0,88	336,8	344,0	355,6
1,057	339,6	347,2	359,6
1,234	341,9	349,8	362,7
1,411	343,6	351,8	365,1
1,588	344,6	353,0	366,6
1,765	345,0	353,4	367,1
1,775	345,0	353,4	367,1

Таблица D.2 Температура на външната стена на обвивката ТОЕ

z [m]	ΔT_{az} [°C]	Tobv(z) при G ₁ [°C]	Tobv(z) при G ₂ [°C]	Tobv(z) при G ₃ [°C]
-1,775	2,59124E-15	290	290	290
-1,598	6,6	296,9	297,0	297,1
-1,421	13,0	304,4	304,6	304,9
-1,244	19,2	312,1	312,6	313,3
-1,067	24,8	320,0	320,8	322,1
-0,89	29,8	327,9	329,1	331,1
-0,713	34,2	335,4	337,2	340,0
-0,536	37,6	342,6	344,9	348,6
-0,359	40,2	349,1	352,0	356,7
-0,182	41,8	354,8	358,4	364,1
-0,005	42,3	359,7	363,9	370,7
0,172	41,8	363,5	368,3	376,2
0,349	40,3	366,2	371,6	380,6
0,526	37,8	367,6	373,7	383,6
0,703	34,4	367,9	374,6	385,4
0,88	30,1	366,9	374,1	385,7
1,057	25,1	364,7	372,3	384,7
1,234	19,5	361,4	369,3	382,2
1,411	13,4	357,0	365,2	378,5
1,588	7,0	351,6	359,9	373,5
1,765	0,4	345,4	353,8	367,5
1,775	2,59124E-15	345,0	353,4	367,1

Таблица D.3 Температура на вътрешната стена на обвивката ТОЕ

z [m]	Tv(z) при G1 [°C]	Tv(z) при G2 [°C]	Tv(z) при G3 [°C]
-1,775	290	290	290
-1,598	297,6	297,7	297,7
-1,421	305,7	305,9	306,2
-1,244	314,1	314,5	315,3
-1,067	322,5	323,3	324,6
-0,89	330,9	332,1	334,1
-0,713	338,9	340,6	343,4
-0,536	346,4	348,7	352,4
-0,359	353,2	356,1	360,8
-0,182	359,1	362,6	368,3
-0,005	364,0	368,2	375,0
0,172	367,7	372,6	380,4
0,349	370,2	375,7	384,6
0,526	371,5	377,6	387,5
0,703	371,4	378,0	388,9
0,88	370,0	377,1	388,8
1,057	367,3	374,9	387,2
1,234	363,4	371,3	384,2
1,411	358,3	366,5	379,8
1,588	352,3	360,7	374,2
1,765	345,4	353,8	367,5
1,775	345,0	353,4	367,1

Таблица D.4 Температура на повърхността на урановата таблетка

z [m]	T _{ks} (z) при G ₁ [°C]	T _{ks} (z) при G ₂ [°C]	T _{ks} (z) при G ₃ [°C]
-1,775	290	290	290
-1,598	397,5	397,5	397,6
-1,421	503,0	503,2	503,6
-1,244	604,0	604,5	605,2
-1,067	698,0	698,8	700,1
-0,89	782,6	783,9	785,8
-0,713	855,9	857,6	860,4
-0,536	916,0	918,3	922,0
-0,359	961,4	964,3	969,0
-0,182	991,1	994,6	1000,3
-0,005	1004,2	1008,4	1015,2
0,172	1000,6	1005,4	1013,3
0,349	980,2	985,7	994,6
0,526	943,6	949,7	959,6
0,703	891,7	898,4	909,2
0,88	825,7	832,9	844,5
1,057	747,3	754,9	767,2
1,234	658,3	666,3	679,2
1,411	561,0	569,2	582,6
1,588	457,8	466,1	479,7
1,765	351,1	359,5	373,2
1,775	345,0	353,4	367,1

Таблица D.5 Температура в центъра на урановата таблетка

z [m]	Tcen(z) при G ₁ [°C]	Tcen(z) при G ₂ [°C]	Tcen(z) при G ₃ [°C]
-1,775	290	290	290
-1,598	559,0	559,1	559,2
-1,421	822,1	822,3	822,7
-1,244	1072,9	1073,3	1074,1
-1,067	1305,1	1305,9	1307,2
-0,89	1513,2	1514,4	1516,4
-0,713	1692,0	1693,7	1696,5
-0,536	1837,1	1839,4	1843,1
-0,359	1945,1	1948,0	1952,7
-0,182	2013,1	2016,7	2022,4
-0,005	2039,7	2043,9	2050,7
0,172	2024,1	2028,9	2036,8
0,349	1966,7	1972,2	1981,1
0,526	1868,9	1875,0	1884,9
0,703	1733,2	1739,8	1750,6
0,88	1562,8	1569,9	1581,5
1,057	1361,8	1369,4	1381,8
1,234	1135,4	1143,3	1156,2
1,411	888,9	897,0	910,4
1,588	628,4	636,7	650,3
1,765	360,2	368,7	382,3
1,775	345,0	353,4	367,1

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Таблицы показващи изменението на температурите за средно натоварен канал

Таблица Е.1 Температура на топлоносителя

z [m]	T _T (z) при G ₁ [°C]	T _T (z) при G ₂ [°C]	T _T (z) при G ₃ [°C]
-1,775	290	290	290
-1,598	290,2	290,2	290,3
-1,421	290,7	290,9	291,0
-1,244	291,7	291,9	292,3
-1,067	292,9	293,3	294,1
-0,89	294,5	295,1	296,2
-0,713	296,3	297,2	298,8
-0,536	298,3	299,6	301,6
-0,359	300,5	302,1	304,7
-0,182	302,8	304,8	308,0
-0,005	305,2	307,5	311,3
0,172	307,6	310,3	314,7
0,349	309,9	313,0	317,9
0,526	312,1	315,5	321,0
0,703	314,2	317,9	323,9
0,88	316,0	320,0	326,5
1,057	317,6	321,8	328,6
1,234	318,8	323,2	330,4
1,411	319,8	324,3	331,7
1,588	320,3	325,0	332,5
1,765	320,6	325,2	332,8
1,775	320,6	325,2	332,8

Таблица Е.2 Температура на външната стена на обвивката на ТОЕ

z [m]	ΔT_{az} [°C]	Tobv(z) при G ₁ [°C]	Tobv(z) при G ₂ [°C]	Tobv(z) при G ₃ [°C]
-1,775	1,49603E-15	290	290	290
-1,598	3,8	294,0	294,0	294,1
-1,421	7,5	298,3	298,4	298,6
-1,244	11,1	302,7	303,0	303,4
-1,067	14,3	307,2	307,7	308,4
-0,89	17,2	311,7	312,4	313,5
-0,713	19,7	316,0	316,9	318,5
-0,536	21,7	320,0	321,3	323,4
-0,359	23,2	323,7	325,3	327,9
-0,182	24,1	326,9	328,9	332,1
-0,005	24,4	329,6	332,0	335,7
0,172	24,1	331,7	334,4	338,8
0,349	23,3	333,2	336,2	341,2
0,526	21,8	334,0	337,3	342,8
0,703	19,8	334,0	337,7	343,7
0,88	17,4	333,4	337,4	343,8
1,057	14,5	332,1	336,3	343,1
1,234	11,3	330,1	334,5	341,7
1,411	7,7	327,5	332,1	339,5
1,588	4,0	324,4	329,0	336,6
1,765	0,2	320,8	325,4	333,0
1,775	1,49603E-15	320,6	325,2	332,8

Таблица Е.3 Температура на вътрешната стена на обвивката на ТОЕ

z [m]	Tv(z) при G ₁ [°C]	Tv(z) при G ₂ [°C]	Tv(z) при G ₃ [°C]
-1,775	290	290	290
-1,598	294,4	294,4	294,4
-1,421	299,0	299,1	299,3
-1,244	303,8	304,0	304,5
-1,067	308,6	309,1	309,8
-0,89	313,4	314,0	315,1
-0,713	317,9	318,9	320,4
-0,536	322,1	323,4	325,5
-0,359	326,0	327,6	330,2
-0,182	329,3	331,2	334,4
-0,005	332,0	334,3	338,1
0,172	334,1	336,8	341,2
0,349	335,5	338,5	343,5
0,526	336,1	339,5	345,0
0,703	336,0	339,7	345,7
0,88	335,1	339,1	345,5
1,057	333,5	337,7	344,6
1,234	331,2	335,6	342,8
1,411	328,3	332,8	340,2
1,588	324,8	329,4	336,9
1,765	320,8	325,5	333,1
1,775	320,6	325,2	332,8

Таблица Е.4 Температура на повърхността на урановата таблетка

z [m]	T _{ks} (z) при G ₁ [°C]	T _{ks} (z) при G ₂ [°C]	T _{ks} (z) при G ₃ [°C]
-1,775	290	290	290
-1,598	349,9	349,9	349,9
-1,421	408,6	408,7	408,9
-1,244	464,9	465,1	465,5
-1,067	517,2	517,6	518,4
-0,89	564,3	565,0	566,1
-0,713	605,1	606,1	607,6
-0,536	638,6	639,9	641,9
-0,359	663,9	665,5	668,1
-0,182	680,4	682,4	685,5
-0,005	687,7	690,1	693,8
0,172	685,7	688,4	692,8
0,349	674,3	677,4	682,3
0,526	654,0	657,3	662,8
0,703	625,0	628,7	634,7
0,88	588,3	592,3	598,7
1,057	544,6	548,8	555,7
1,234	495,1	499,5	506,6
1,411	440,9	445,4	452,8
1,588	383,4	388,0	395,5
1,765	323,9	328,6	336,2
1,775	320,6	325,2	332,8

Таблица Е.5 Температура в центъра на урановата таблетка

z [m]	T _{cen} (z) при G ₁ [°C]	T _{cen} (z) при G ₂ [°C]	T _{cen} (z) при G ₃ [°C]
-1,775	290	290	290
-1,598	439,6	439,6	439,7
-1,421	585,9	586,0	586,2
-1,244	725,3	725,6	726,0
-1,067	854,5	854,9	855,7
-0,89	970,2	970,9	972,0
-0,713	1069,6	1070,6	1072,1
-0,536	1150,3	1151,6	1153,7
-0,359	1210,4	1212,0	1214,6
-0,182	1248,2	1250,2	1253,4
-0,005	1263,0	1265,3	1269,1
0,172	1254,3	1257,0	1261,4
0,349	1222,4	1225,4	1230,4
0,526	1168,0	1171,4	1176,9
0,703	1092,5	1096,2	1102,2
0,88	997,7	1001,7	1008,2
1,057	886,0	890,2	897,1
1,234	760,1	764,5	771,6
1,411	623,0	627,5	634,9
1,588	478,1	482,8	490,3
1,765	329,0	333,7	341,3
1,775	320,6	325,2	332,8