

ОПРЕДЕЛЯНЕ НА РАЗМЕРИТЕ НА КРИТИЧНИ ДЕФЕКТИ НА ТРЪБОПРОВОДИ В “АЕЦ КОЗЛОДУЙ”

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ КРИТИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ В ТРУБОПРОВОДАХ “АЭС КОЗЛОДУЙ”

ASSESSMENT OF THE SIZE OF THE CRITICAL DEFECTS IN THE PIPE-LINES IN KOZLODUY NPP

Физ. Димова Г.Т.¹

Инж. Юруков, В.И.²

Физ. Дживджанов, К.Б.²

¹ОКС-ИЦ ДиК, “АЕЦ Козлодуй” ЕАД, Козлодуй, България

²“АТП – АтомТоплоПроект ООД”, София, България

e-mail адреси на авторите: gdimova@npp.bg, v.yurukov@atomtoploproekt.com, k.djivdjanov@atomtoploproekt.com

Abstract: *This paper describes an approach for assessment of the size of the critical defects in the pipe-lines of the equipment of KNPP. The subject concerns material properties, temperature and stress fields calculations, as well as fracture mechanics assessment of the welds against plastic collapse and brittle fracture. The current investigation can be used for qualification of non-destructive examinations.*

KEY WORDS: NUCLEAR POWER PLANT, MATERIAL PROPERTIES, TEMPERATURE AND STRESS FIELDS CALCULATIONS, CRITICAL SIZE OF THE DEFECTS.

1. Въведение

Целта на настоящия доклад е да представи подход при определяне на размерите на критични дефекти на тръбопроводи при тяхната експлоатация в “АЕЦ Козлодуй”. Темата на доклада произтича от Програмата за квалификация на безразрушителния контрол на съоръжения, важни за безопасната експлоатация на блоковете в “АЕЦ Козлодуй”, с идентификационен номер ЦДК.ККБР.ПМ.133, [1]. Програмата обхваща съоръжения от първи контур на АЕЦ, а също и отделни компоненти, за които има специфични изисквания за провеждане на контрола.

Част от щуцерите към тръбопроводите и тръбопроводните системи имат термична ризница от друга марка стомана. Различие в термичните свойства (в топлопроводимостта λ , в специфичния топлинен капацитет C_p , в плътността ρ , в коефициента на линейно температурно разширение α) на биметалните заварени съединения формира зони на завишени напрежения при термохидравличното натоварване на тръбопроводната система при работата на блока в различните режими на експлоатация. Тази предпоставка, в условията на продължаване на срока на експлоатация на блокове ВВЕР-1000 до 60 години, и поради спецификата на безразрушителния контрол, води до необходимостта от квалифициране на контрола на заварените съединения на щуцерите. Такива са щуцери от хидроаккумулятори САОЗ (система за аварийно охлаждане на зоната), Ду 300, щуцери при компенсатора на налягането, щуцери към главния циркуляционен тръбопровод ГЦТ Ду 850.

За успешното квалифициране на безразрушителния контрол на тези обекти трябва да се подготвят сравнителни блокове (тест-образци) с дефекти. Предварително трябва да са известни размерите и местоположението на дефектите (критични), така че те да се имплантират при изготвянето на образците. Критичният дефект е с размери, при достигането на които настъпва неговото неустойчиво състояние. Дефектът се развива стабилно до достигане на критични размери, а при достигане на тези размери, ръстът на дефекта е бърз и неустойчив. За всеки щуцер трябва да се определи този минимален дефект, който може да бъде детектиран и оразмерен с вероятност на 100% по процедура за УЗК, и при чието нарастване при последващата експлоатация на съоръжението, до края на предвидения експлоатационен срок, коефициентът на интензивност на напреженията K_I няма да достигне гранични

стойности K_{IC} по якостните нормативи, ПНАЭГ-7-002-86, [2].

Размерите и местоположението на дефектите се определят чрез структурни пресмятания и последващ анализ по механика на разрушаването в различните режими на експлоатация на АЕЦ.

Настоящия доклад разглежда подход за определяне на размери на критични дефекти в биметални заварени съединения на щуцери САОЗ.

2. Методология

2.1. Използвани съкращения

a – размер на полуос на елипсата на схематизиран дефект;
 K_I – коефициент на интензивност на нормалните (мода I т.е.

отварящи) напрежения във върха на дефекта, КИН; K_{IC} – критична стойност на КИН;

$\Delta K = K_{max} - K_{min}$ – размах на КИН;

$R = \frac{K_{min}}{K_{max}}$ – коефициент на асиметрия R;

N – брой цикли на натоварване;

m – характеристика на материала по закона на Парис;

$НДС$ – Напрегнато-деформируемо състояние на елемента;

$КЕМ$ – крайно-елементен модел; $МКЕ$ – метод на крайните елементи; $2D/3D$ – дву-/три-мерно (моделиране);

$КИН$ – Коефициент на интензивност на напреженията;

$САОЗ$ – Система за аварийно охлаждане на зоната;

$Ду$ – Диаметър условен.

$НУЕ$ – Нормални условия за експлоатация;

$ННУЕ$ – Нарушение на нормалните условия за експлоатация;

$ХИ$ – Хидравлични изпитания;

$АС$ – Аварийни ситуации и въздействия от максимално рязчетно и проектно земетресение;

$НДС$ – Напрегнато деформационно състояние;

$КЕМ$ – Крайно-елементен модел;

$МКЕ$ – Метода на крайните елементи;

LLF – Пределни пластически състояния (LLF - limit load failure).

2.2. Определяне на критичните размери

Определянето на критичните размери става по алгоритъма:

- Критичният характерен размер на дефекта е $a_{qual} = [a]$, а грешката при определянето му, произтичаща от процедурата за контрол е Δ_a ;

- Задачата е да се определи този дефект с характерен размер $a_0 = a + \Delta_a$, който до следващия експлоатационен контрол ще нарастне с da до размер $a_1 = a_0 + da$; или $a_1 = a + \Delta_a + da$;

- Скоростта на нарастване на дефекта da се определя по Методика за определяне на допустими размери на дефекти в метала на оборудване и тръбопроводи по време на експлоатацията на АЕЦ, М-02-91, [3];

- Търсената стойност a_0 е онази стойност, за която неравенството $a_1 \leq [a]$, гарантиращо целостта на структурата, преминава в равенство;

- От така оценената стойност a_0 определяме размер на дефект, откриваем на 100% от процедурата за УзК: $a_{100\%} = a = a_0 - \Delta_a$.

2.3. Пресмятания на температурни и напрежениви полета

Неустойчиво състояние на компонент с дефект настъпва най-често при аварийни режими на работа. Нарастването на дефектите, от друга страна, става вследствие цикличното натоварване при въздействието на различни по произход механични и термични товари, възникващи в тръбопроводните системи при експлоатацията на енергоблока, както в нормални, така и в другите режими на работа. Поради това, структурните пресмятания обхващат целия спектър разчетни режими на работа на съоръженията, а именно: НУЕ, ННУЕ, ХИ и АС.

Оценява се НДС при въздействието на следните, ясно дефинирани основни натоварващи фактори: а) вътрешно и/или външно налягане; б) максимално статично налягане на съдържания флуид при оперативни условия; с) собствено тегло, вкл. изолацията; д) максимално тегло на съдържания флуид при оперативни условия; е) тегло на флуида при хидравлично изпитване; ф) остатъчни напрежения по дебелината на заварените съединения; г) сеизмични натоварвания; х) товари от силите на реакция при укрепването на тръбопровода; j) динамични натоварвания от воден удар или пулсации във флуида, вибрационни натоварвания; к) напрежения от сили на огъване; l) напрежения, породени от температурни разлики и разлики в коефициентите на термично разширение на материалите (основен метал, заварен и наплавен метал); m) напрежения, породени от колебания в налягането и температурата.

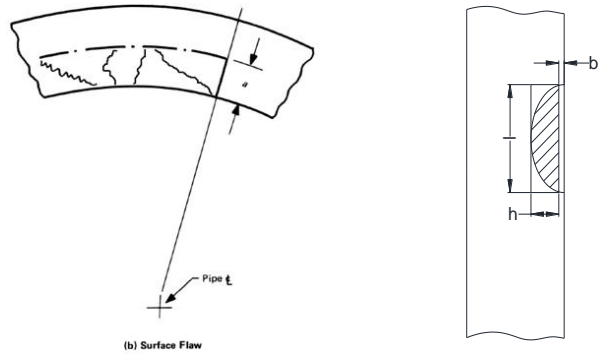
Пресмятания се правят с помощта на компютърно моделиране на изследваните обекти, на които се построяват 3D крайно-елементни модели (КЕМ). Със симулационни програми, работещи по метода на крайните елементи (МКЕ), като първи етап от структурните пресмятания, върху построените 3D КЕМ, се стартират топлопреносни симулации на изчислителните преходни процеси. Като резултат се получават температурните разпределения в (3D КЕМ на) изследвания елемент за различни представителни моменти от времето на протичане на транзienta. Следващия (втори) етап е получаването полетата на напреженията (т.е. НДС) вследствие на механичните товари (вътрешно налягане, сили и моменти от тръбопроводите и т.н.) и тези от термичните такива. Посредством анализ на резултатите от пресмятанията се определят най-натоварените зони на изследваните обекти.

2.4. Анализ по механика на разрушаването

2.4.1. Оценка на докритични размери на дефекта

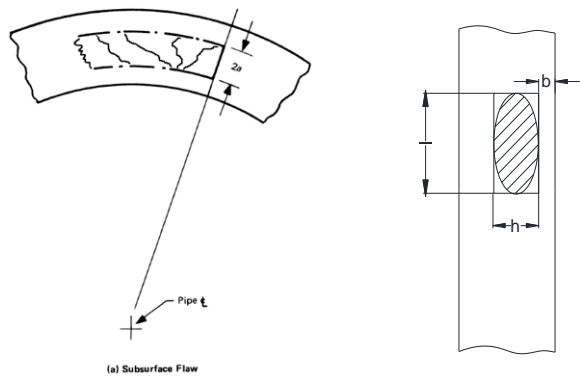
В определените по-горе в т.2.3 т.нар. лимитиращи зони на изследваните обекти се постулира наличието на плосък дефект от тип пукнатина. Дефектите се схематизират във вид

на елипси или полуелипси с полуоси a и c , [4], както е показано на Фигура 1.



Фамилия повърхностни пукнатини, проектиращи се в една и съща аксиална вътрешна пукнатина с характерен размер дълбочина на проникване $h=2a$

Схематизация на дефекти, които се привеждат към повърхностни



Фамилия вътрешни пукнатини, проектиращи се в една и съща аксиална вътрешна пукнатина с характерен размер дълбочина на проникване $h=2a$

Схематизация на дефекти, които са подповърхностни

Фиг. 1: Схематизация на вътрешни (елиптични) и на (условно)повърхностни (полуелиптични) пукнатини.

Разглеждат се два критерия за достигане на гранично състояние при нарастването на дефекта: пределни състояния с използване на КИН, и пределни пластически състояния (LLF). За оценка на феритните компоненти се прилагат и двата критерия. За неръждаеми аустенитни компоненти /тръбопроводи се използва само критерия за пределни пластически състояния (LLF).

2.4.2 Оценка на нарастването на дефекта

Прилага се модела на Парис, при който се разглежда нарастването на дефектите вследствие на цикличното изменение на натоварването в процеса на експлоатация.

$$\frac{da}{dN} = C_0 \cdot \left(\frac{\Delta K}{\sqrt{1-R}} \right)^m$$

Граничното състояние на обекта при наличие на дефект се определя, ако е изпълнено:

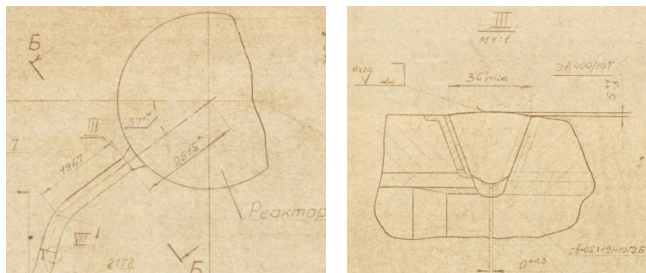
$$K_I \leq [K_I] \text{ по критерия КИН и}$$

$$R_F^T = 1.2 \cdot R_{F0.2}^T \text{ по критерия LLF}$$

3. Резултати

Дадени са резултати за щуцери Ду300 от хидроакумулаторите (ХА) към горна (ГСК) и долна (ДСК)

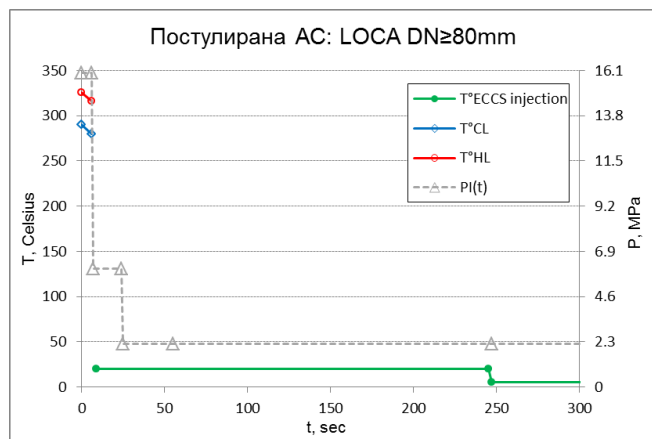
смесителни камери с термичен ръкав на пасивната система за САОЗ. Предназначението на САОЗ е за бързо подаване на разтвор на борна киселина в корпуса на реактора КР за разхлаждане на активната зона и нейното заливане при авария със загуба на топлоносител (т.нар. LOCA), когато налягането в първи контур (P1) падне под 5.9 МПа. Пасивната част (ПЧ) на САОЗ се състои от резервоари (ХА) на САОЗ, съединителни тръбопроводи Ду300 за свързка на ХА на САОЗ с КР и арматура на отделните тръбопроводи. Четирите щуцера Ду300 на САОЗ ПЧ към КР са разположени по двойки - два диаметрално противоположни върху пръстена (обечайката) с щуцери Ду850 на ДСК, и два диаметрално противоположни върху пръстена с щуцери Ду850 на ГСК. Всичките четири щуцера Ду300 са с аналогична геометрия. Всеки един от тях има термична риз(ниц)а от неръждаема хром-никелова аустенитна стомана.



Частта на тръбопровод тип I от САОЗ към ДСК на КР, Поглед отгоре
Сечение III – з.с. на тръбопровод тип I от САОЗ към Щуцер Ду300 на ДСК

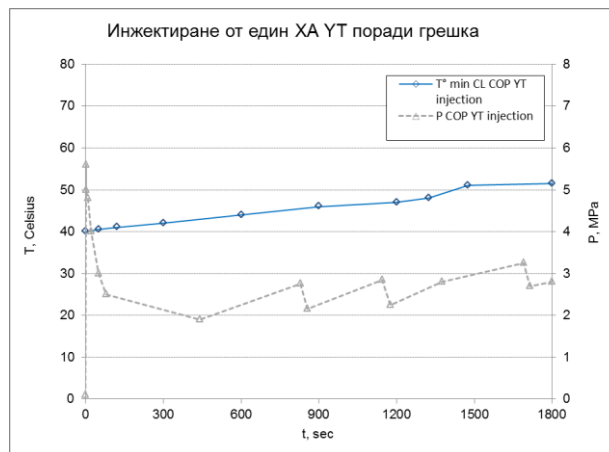
Фиг. 2: Частта на тръбопровод от САОЗ към ДСК на КР (поглед отгоре). Заварено съединение, Y-тип.

За оценка на нарастването на дефектите са използвани 15 преходни процеси и стационарни състояния, характерни за работата на система САОЗ. За оценка на критичните размери са разгледани две представителни АС, в хода на които $P_1 < 5.9$ МПа и ПЧ на САОЗ сработва. Развитието на температурите и налягането за тези две АС са дадени по-долу на Фигури 3 и 4.



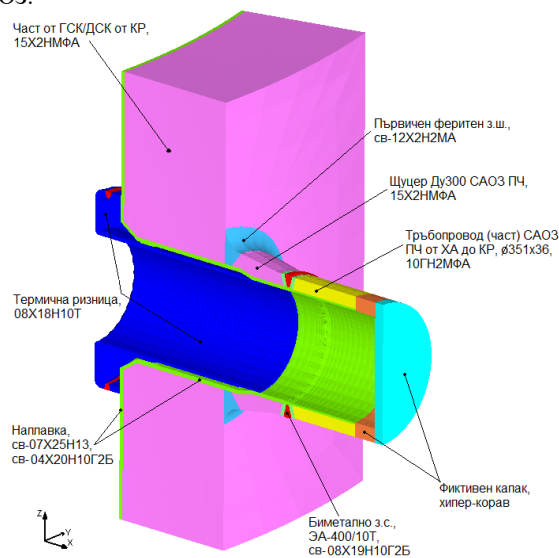
Фиг. 3: Развитие във времето t на налягането $P_1(t)$ и температурите в първи контур при постулиран режим АС: Среден и Голям теч: скъсване на тръбопр. с Ду>80 mm, вкл. Ду 850 (съкр. LOCA DN≥80 mm)

T°HL - червена - температури на изхода от КР в ГСК,
T°CL - синя - на входа в КР, в ДСК
T°ECCS injection - зелена - при подаване на борна киселина в щуцерите Ду300 на САОЗ ПЧ

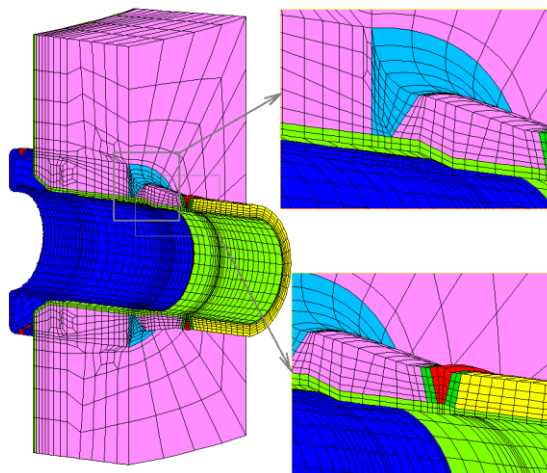


Фиг. 4: Развитие във времето t на налягането P (в I-ви контур при постулиран режим АС: Защита от студена опресовка: Инжектиране от един ХА УТ поради грешка (съкр. COP YT injection). Развитие на усреднената температура в студения край на ГЦТ, в ДСК (T°min CL COP YT injection - синя)

На Фигури 5 и 6 са показани КЕМ на Щуцер Ду 300 към САОЗ.

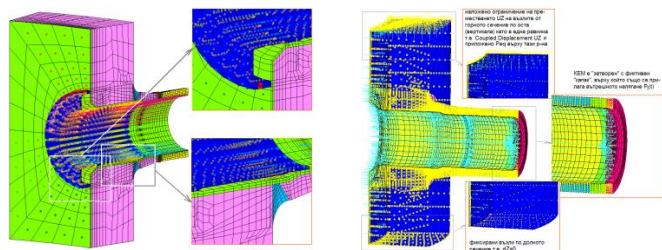


Фиг. 5: КЕМ на Щуцер Ду300 САОЗ ПЧ - основни елементи и материалите, от които са направени



Фиг. 6: Разрез представящ 1/2 от КЕМ на Щуцер Ду300 от САОЗ ПЧ с близък поглед върху зоните на първичен заваръчен шев (горе) и биметалното заварено съединение (долу)

На Фигура 7 са илюстрирани граничните и начални условия при стартиране на симулации от етап 1 (решаване на топлопреносна задача) и етап 2 (определяне на НДС) с използване на 3D KEM.

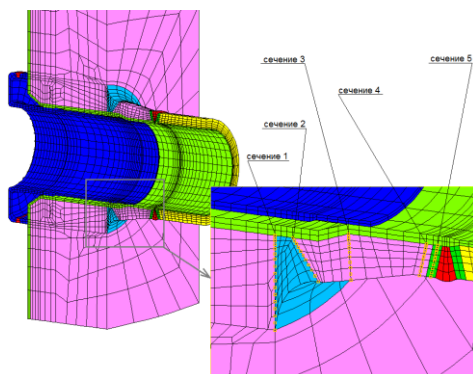
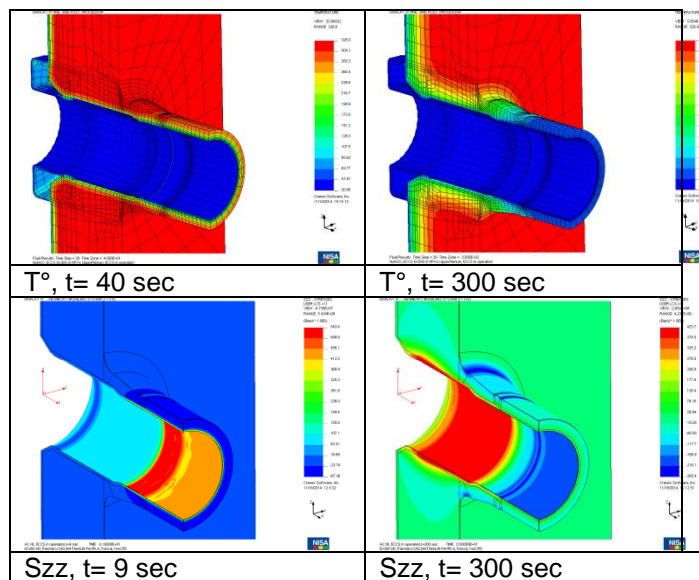


Етап 1: топлопреносна задача

Етап 2: определяне НДС

Фиг. 7: Гранични и начални условия при решаването на етапите от пресмятания на напрегнато-деформационно състояние с използване на 3D KEM

От оценката на разпределенията на аксиални (S_{zz}) и кръгови ($S_{\theta\theta}$) термични напрежения, в режим LOCA $DN \geq 80 \text{ mm}$, са избрани някои характерни моменти от развитието на анализирания транзienti. Определят се сеченията, за които се пресмятат размерите на критични дефекти, (Фигура 8).



Фиг. 8. Разпределение на температурите (горния ред) и на аксиални (S_{zz}) термични напрежения. Сеченията на позиция - 90° , за които са извършени пресмятанията за размери на критичните дефекти съгласно М-02-91, [3].

За разгледаните пет сечения най-неблагоприятни са резултатите за:

а) аксиални пукнатини - разположени в близост до първичния феритен шев на щуцера (феритно сечение 2). Например за условно повърхностните дефекти се наблюдава нарастване, достигащо до 2.0 mm за 4 годишен период (при $h/l=0.15$) и

съответно 9.4 mm за 30 годишен период (отново се достига при $h/l=0.15$).

б) кръгови пукнатини - разположени в близост до биметалното з.с. (феритно сечение 4). За тях имаме нарастване на размерите, достигащо до 0.8 mm за 4 годишен период, съответно 4.4 mm за 30 годишен период. Максимално нарастване по h за условно повърхностни дефекти с отношение $h/l=0.15$ се получава за аксиални пукнатини, разположени във феритно сечение 1, съответно 6.4 mm за 4 годишен период и 26.1 mm за 30 годишен период.

Резултатите за пукнатини с отношение на осите $a/c=0.3$ и $a/c=0.7$, за срок между два поредни БПК от 4 години, са представени в Таблица 1.

за условно повърхностни дефекти	
$a/c=0.3$	$a/c=0.7$
$a=6.0 \text{ mm}$, $2c=40.0 \text{ mm}$ ($h/l=0.15$; $h=6.0 \text{ mm}$, $l=40.0 \text{ mm}$)	$a=7.7 \text{ mm}$, $2c=22.0 \text{ mm}$ ($h/l=0.35$; $h=7.7 \text{ mm}$, $l=22.0 \text{ mm}$)
за подповърхностни дефекти	
$a=3.65 \text{ mm}$, $2c=24.3 \text{ mm}$ ($h/l=0.30$ --- $h=7.3 \text{ mm}$, $l=24.3 \text{ mm}$)	$a=4.7 \text{ mm}$, $2c=13.4 \text{ mm}$ ($h/l=0.70$; $h=9.4 \text{ mm}$, $l=13.4 \text{ mm}$)

Таблица 1: Размери на критични дефекти

5. Заключение

Въпреки тежките натоварващи транзienti, тяхното термично влияние се намалява значително от наличието на термична риза и относително дебела наплавка на щуцери Ду300 САОЗ ПЧ. Показаният подход за оценка на размери на критични дефекти демонстрира как местата за контрола могат да се определят, освен на основание нормативните изисквания, също и на база оценка на НДС на обектите. Този подход има няколко съществени значения за дейности по експлоатацията на ядрените блокове. От оценката на термо-хидравличните натоварвания може да се определят местата, обемите и периодичността на провеждания експлоатационен контрол. Получените резултати са важни за изготвяне на тест-образци за целите на квалификацията на безразрушителния контрол.

6. Литература

- Програма за квалификация на безразрушителния контрол на съоръжения, важни за безопасната експлоатация на блоковете в "АЕЦ Козлодуй", идентификационен № ЦДК.ККБР.ПМ.133
- ПНАЭГ 7-002-86 Правила и норми в атомной энергетике. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов АЭС
- Методика за определяне на допустими размери на дефекти в метала на оборудване и трубопроводи по време на експлоатация на АЕЦ, Москва, 1991 г., М-02-91;
- Методология за провеждане на анализите по тема: „Определяне размерите на критични дефекти на тръбопроводи от СБ и СВБ, 5 и 6 блок на „АЕЦ Козлодуй“ ЕАД, CSDPL-АТР-СТ/002/05.10.12, изд. АТП-АтомТоплоПроект
- Анализ по тема: Определяне размерите на критични дефекти на тръбопроводи от СБ и СВБ, 5 и 6 бл. АЕЦ Козлодуй. Етап: Щуцери Ду300 от САОЗ ПЧ на КР, идентификационен № CSDPL-АТР-СТ/005/27.11.14
- Техническо задание за "Определяне на размери на критични дефекти на щуцери на тръбопроводи от СБ и СВБ, 5 и 6 бл. АЕЦ Козлодуй"; документ на "АЕЦ Козлодуй"

