



АТОМНА ЕЛЕКТРОЦЕНТРАЛА “КОЗЛОДУЙ”

**КАЛИБРИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА
ДЪЛБОЧИНАТА НА ИЗГАРЯНЕ НА ОЯГ ОТ ВВЕР-440
В ХОГ НА АЕЦ “КОЗЛОДУЙ”**

Антон Матеев, Гл.експерт, АЕЦ “Козлодуй” , ЕП-2, с-р “Радиохимия”



КАЛИБРИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ДЪЛБОЧИНАТА НА ИЗГАРЯНЕ НА ОЯГ ОТ ВВЕР-440 В ХОГ НА АЕЦ “КОЗЛОДУЙ”

Необходимост и изисквания към измерването на дълбочината на изгаряне на отработило гориво от ВВЕР-440

- Във връзка с изискване на АЯР за контрол на дълбочината на изгаряне на зарежданото отработило гориво в контейнери тип Констор 440/84 се наложи да се разработи и въведе в експлоатация система за измерване на дълбочината на изгаряне на ОЯГ от реактори ВВЕР-440 в ХОГ на АЕЦ “Козлодуй”





КАЛИБРИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ДЪЛБОЧИНАТА НА ИЗГАРЯНЕ НА ОЯГ ОТ ВВЕР-440 В ХОГ НА АЕЦ “КОЗЛОДУЙ”

- Основните изисквания към системата са:
 - представителност на резултатите;
 - лесно обслужване;
 - бързо получаване на резултатите от измерването;
 - приемлива цена;





КАЛИБРИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ДЪЛБОЧИНАТА НА ИЗГАРЯНЕ НА ОЯГ ОТ ВВЕР-440 В ХОГ НА АЕЦ “КОЗЛОДУЙ”

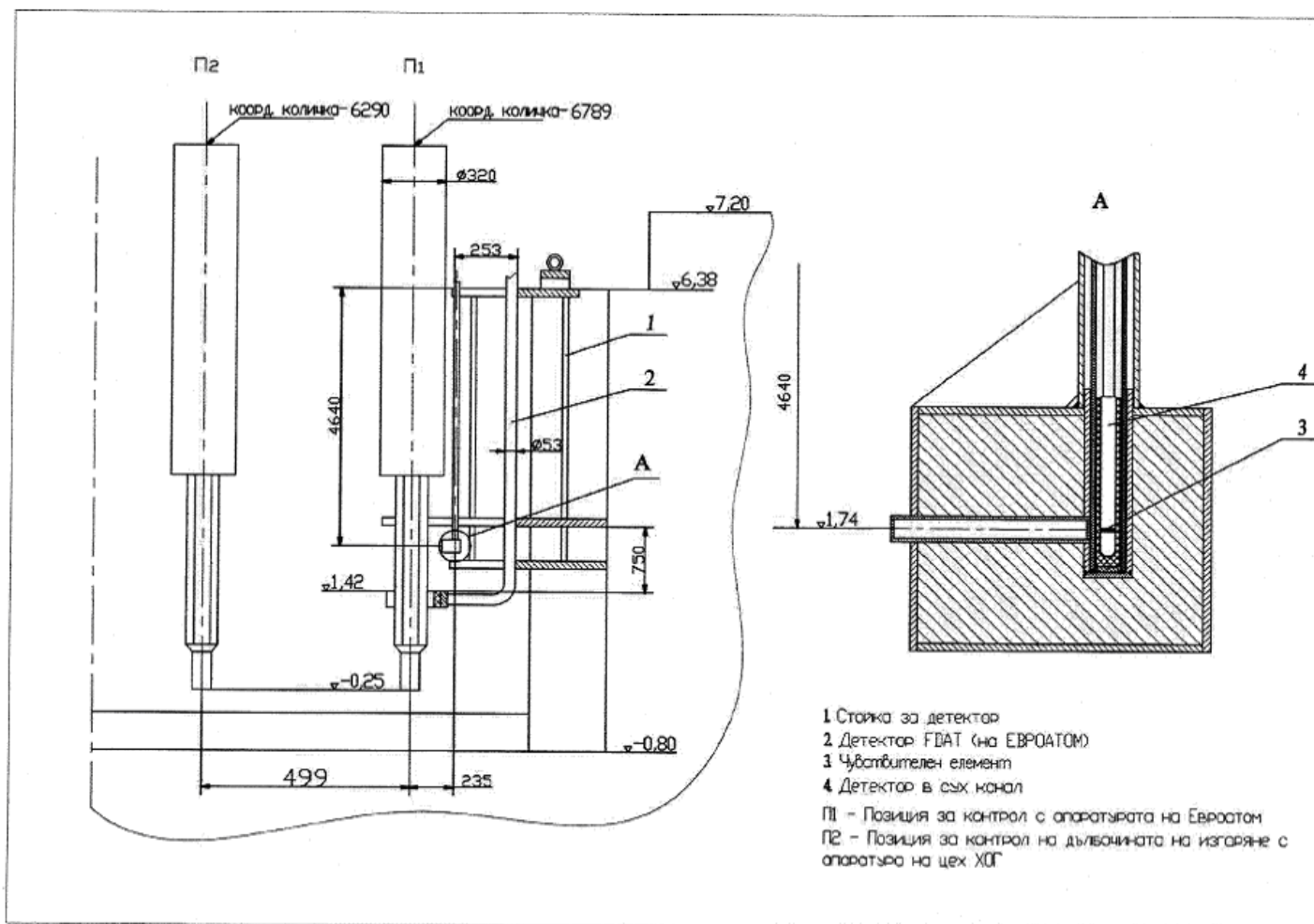
- **Измервателна система**

- детектор CdZnTe SDP310/Z/60/S на Ritec
- многоканален анализатор MCA-527 на GBS elektronik ;
- сух канал с колиматор за монтиране в басейна на ХОГ ;
- Разположението на системата в басейна на ХОГ е показано на фигура 1 ;





КАЛИБРИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ДЪЛБОЧИНАТА НА ИЗГРЯНЕ НА ОЯГ ОТ ВВЕР-440 В ХОГ НА АЕЦ “КОЗЛОДУЙ”





КАЛИБРИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ДЪЛБОЧИНАТА НА ИЗГАРЯНЕ НА ОЯГ ОТ ВВЕР-440 В ХОГ НА АЕЦ “КОЗЛОДУЙ”

- **Калибриране по цезий-137 и разчетните дълбочини на изгаряне :**
 - Разчетните дълбочини на изгаряне са определени с програмен комплекс КАСКАД
 - Измерва се фоновата скорост на броене в пика на цезий-137 без поставена за измерване касета за време 10000 секунди.
 - За всяка от избраните за калибриране касети се снима се спектър на касетата на позицията за измерване до набиране на 10000 импулса или до неопределеност под 1% на площта на пика на цезий-137 (и около 1000 импулса в пика на цезий-134). Определят се скоростите на броене по цезий-137 и цезий-134.





КАЛИБРИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ДЪЛБОЧИНАТА НА ИЗГАРЯНЕ НА ОЯГ ОТ ВВЕР-440 В ХОГ НА АЕЦ “КОЗЛОДУЙ”

- **Калибриране по цезий-137 и разчетните дълбочини на изгаряне**
 - Извършват се корекции за фон и за разпад за периода от момента на завършване на работата на касетата в реактора до момента на измерване.
 - По така получените стойности и по разчетните дълбочини на изгаряне на касетите се определя зависимостта на коригираната скорост на броене по цезий-137 от изгарянето (линейна зависимост).
 - Получените зависимости се използват за определяне на дълбочината на изгаряне на касетите.





КАЛИБРИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ДЪЛБОЧИНАТА НА ИЗГАРЯНЕ НА ОЯГ ОТ ВВЕР-440 В ХОГ НА АЕЦ “КОЗЛОДУЙ”

- Проверка на калибровката по измереното отношение цезий-134/цезий-137.
 - За избягване на евентуална систематична грешка в резултат на използването на изчислени дълбочини на изгаряне, се налага получената калибровъчна крива да се провери с използване на измерени дълбочини на изгаряне.
 - Пресмята се теоретично отношението на активностите на цезий-134 и цезий-137 със софтуерния продукт SCALE. Типична зависимост на отношението на цезий-134 към цезий-137 от дълбочината на изгаряне е показана на фигура 2.
 - Отношението на коригираните площи на пиковете и отношението на активностите за всички дълбочини на изгаряне са свързани с един и същ множител K_1 , независещ от дълбочината на изгаряне Bu .

$$\frac{S_{Cs-134}}{S_{Cs-137}} = K_1 * \frac{A_{Cs-134}(Bu)}{A_{Cs-137}(Bu)}$$





КАЛИБРИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ДЪЛБОЧИНАТА НА ИЗГАРЯНЕ НА ОЯГ ОТ ВВЕР-440 В ХОГ НА АЕЦ “КОЗЛОДУЙ”

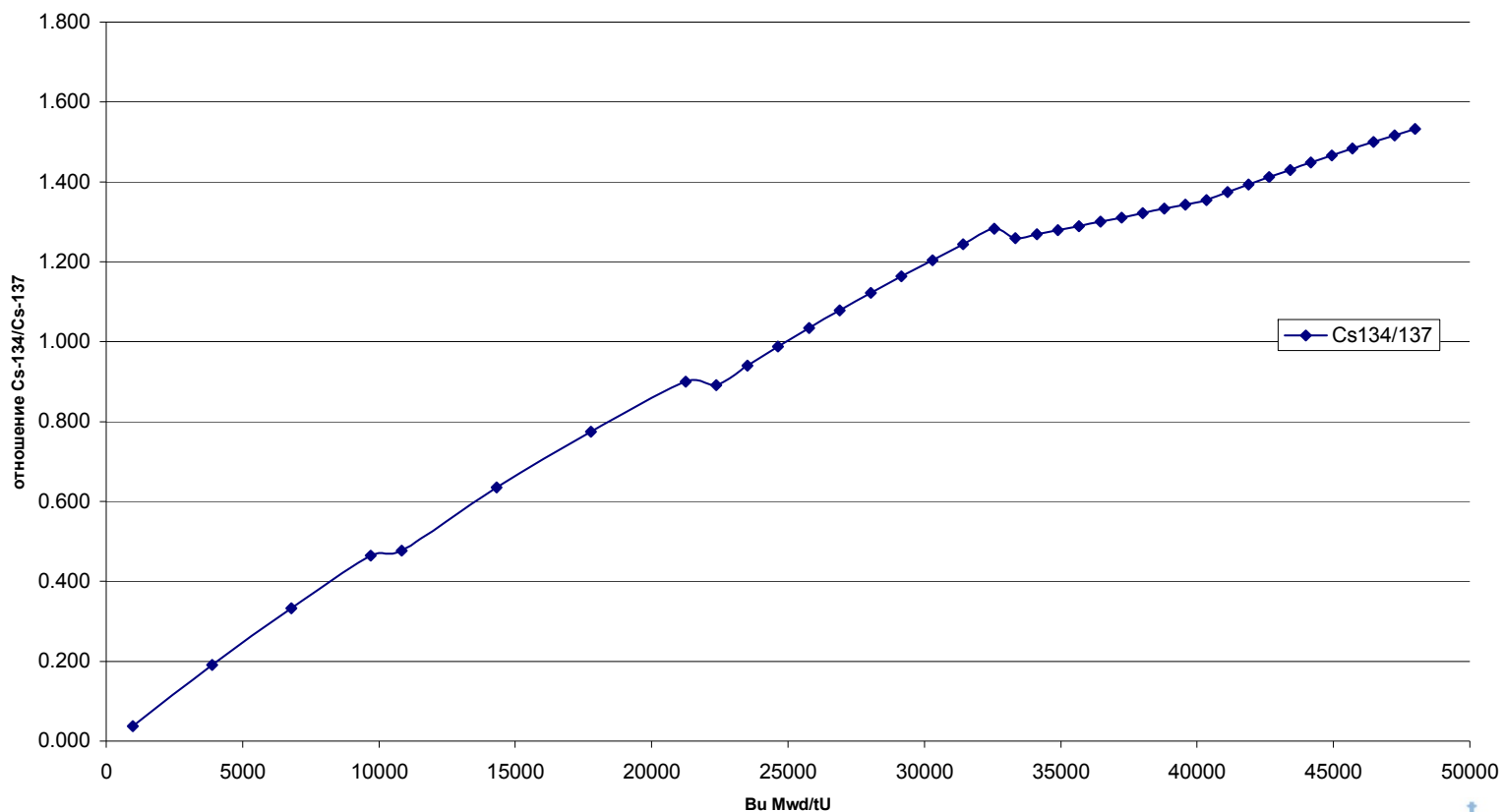
- **Проверка на калибровката по измереното отношение цезий-134/цезий-137.**
 - За определянето на K1 използваме касетата с максимална дълбочина на изгаряне.
 - Така определеният преходен множител се използва за определяне на отношението на активностите на цезий-134 и цезий-137, съответно на дълбочината на изгаряне по това отношение за касетите използвани за калибриране при по-малките дълбочини на изгаряне.
 - Построява се калибровъчна крива по определените дълбочини на изгаряне и по коригираните площи на пиковете на цезий-137.
 - Сравняват се така определената калибровъчна крива с построената по разчетните дълбочини на изгаряне. При разлика до 10% калибровката по цезий-137 може да се използва за определяне на дълбочината на изгаряне за всички останали касети.





КАЛИБРИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ДЪЛБОЧИНАТА НА ИЗГАРЯНЕ НА ОЯГ ОТ ВВЕР-440 В ХОГ НА АЕЦ “КОЗЛОДУЙ”

Фигура 2. Типичен ход на отношението Cs-134/Cs-137 като функция на дълбочината на изгаряне и на историята на облъчването на ТОС в активната зона





КАЛИБРИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ДЪЛБОЧИНАТА НА ИЗГАРЯНЕ НА ОЯГ ОТ ВВЕР-440 В ХОГ НА АЕЦ “КОЗЛОДУЙ”

- **Определяне на разстоянието детектор-касета при измерване.**

За определяне на оптималното разстояние от детектора до касетата е използвана касета с разчетна дълбочина на изгаряне 19.94 МВт.Д/кгU (К-5 от списъка с използваните за калибриране). Разстоянието от детектора до касетата се избира по следните критерии:

- Неопределеност на скоростта на броене в пика на цезий-137 около 1%;
- Приемливо време на измерване;
- Минимално възможно мъртво време – подбира се така че да не се наблюдават деформации на спектъра;
- Резултатите от определянето на разстоянието на измерване са показани в таблица 1.





КАЛИБРИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ДЪЛБОЧИНАТА НА ИЗГАРЯНЕ НА ОЯГ ОТ ВВЕР-440 В ХОГ НА АЕЦ “КОЗЛОДУЙ”

- Таблица 1.

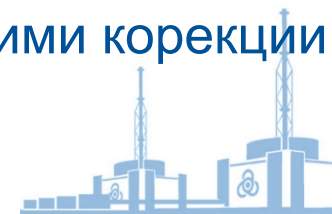
Разстояние, мм	Скорост на броене Cs-137, cps	Мъртво време, %	Допустимост на измерването
D0	1113	98.8	не
D0+200	625.7	67.5	не
D0+400	135.0	20.4	не
D0+450	86.65	14.0	да
D0+450a	87.36	14.1	да, тест за препозициониране
D0+500	56.10	9.6	да
D0+499	57.46	9.7	да, избор за измерване





КАЛИБРИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ДЪЛБОЧИНАТА НА ИЗГАРЯНЕ НА ОЯГ ОТ ВВЕР-440 В ХОГ НА АЕЦ “КОЗЛОДУЙ”

- **Резултати от калибрирането.**
 - Извършени са измерванията на фона и на избраните калибровъчни касети. Резултатите са показани в таблица 2.
 - В процеса на измерване и уточняване на горивната история на измерваните касети бяха направени следните корекции:
 - за касета К7 е извършена допълнителна корекция за отчитане на по-голямото поглъщане на лъчението в чохъла на касетата (при нея е 2 мм вместо 1.5 мм).
 - за касети К6 и К9 е извършена допълнителна корекция по разчетните стойности на активностите за Cs-137 с цел отчитане на паузата в облъчването им.
 - за касета К6 допълнително е коригирана стойността на дълбочината на изгаряне по разчетните данни за градиента, тъй като тя не е измервана завъртяна на 180°.
 - Резултатите с въведени всички необходими корекции са показани в таблица 3.

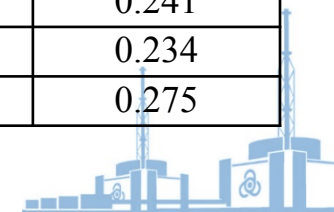




КАЛИБРИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ДЪЛБОЧИНАТА НА ИЗГАРЯНЕ НА ОЯГ ОТ ВВЕР-440 В ХОГ НА АЕЦ “КОЗЛОДУЙ”

Таблица 2

касета	$BU_{\text{разч.}^2}$ МВт.ден/кгU	$I_{\text{Cs137}}, \text{ cps}$	$dI_{\text{Cs137}}, \text{ cps}$	$I_{\text{Cs134}}, \text{ cps}$	$dI_{\text{Cs134}}, \text{ cps}$
-	0	0	0	0	0
K1	8.47	27.198	0.269	1.377	0.115
K1_rot	8.47	19.181	0.192	0.763	0.083
K2	13.26	32.255	0.319	1.736	0.147
K2_rot	13.26	38.662	0.362	2.823	0.181
K3	15.31	42.458	0.405	2.773	0.206
K4	17.3	43.889	0.276	3.147	0.145
K4_rot	17.3	47.6	0.325	4.004	0.176
K5	19.94	57.433	0.294	5.308	0.161
K5_rot	19.94	47.068	0.268	4.14	0.147
K6	23.64	64.841	0.387	5.008	0.216
K7	26.46	57.413	0.279	0.668	0.133
K7_rot	26.46	57.189	0.283	0.596	0.144
K8	30.45	80.358	0.41	7.616	0.241
K9	34.11	84.158	0.404	7.425	0.234
K10	40.35	103.462	0.472	8.458	0.275

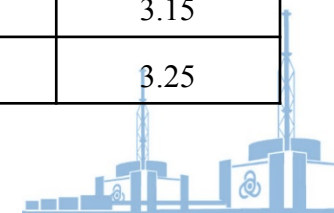




КАЛИБРИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ДЪЛБОЧИНАТА НА ИЗГАРЯНЕ НА ОЯГ ОТ ВВЕР-440 В ХОГ НА АЕЦ “КОЗЛОДУЙ”

Таблица 3

касета	$BU_{\text{разч.}}$, МВт.ден/кгU	I_{Cs137} , cps	dI_{Cs137} , %	I_{Cs134} , cps	dI_{Cs134} , %
-	0	0	0	0	0
K1	8.47	28.67	1	23.9	9.7
K2	13.26	43.84	0.96	50.91	7.51
K3	15.31	52.5	0.95	61.93	7.43
K4	17.3	56.56	0.66	79.86	4.5
K5	19.94	64.6	0.54	105.51	3.3
K6	26.31	83.94	0.6	132.54	4.31
K7	26.46	83.85	0.49	119.89	22.14
K8	30.45	100.72	0.51	207.7	3.16
K9	34.11	108.54	0.48	232.87	3.15
K10	40.35	131.87	0.46	294.64	3.25





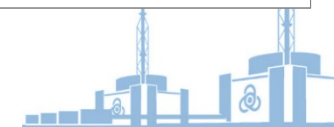
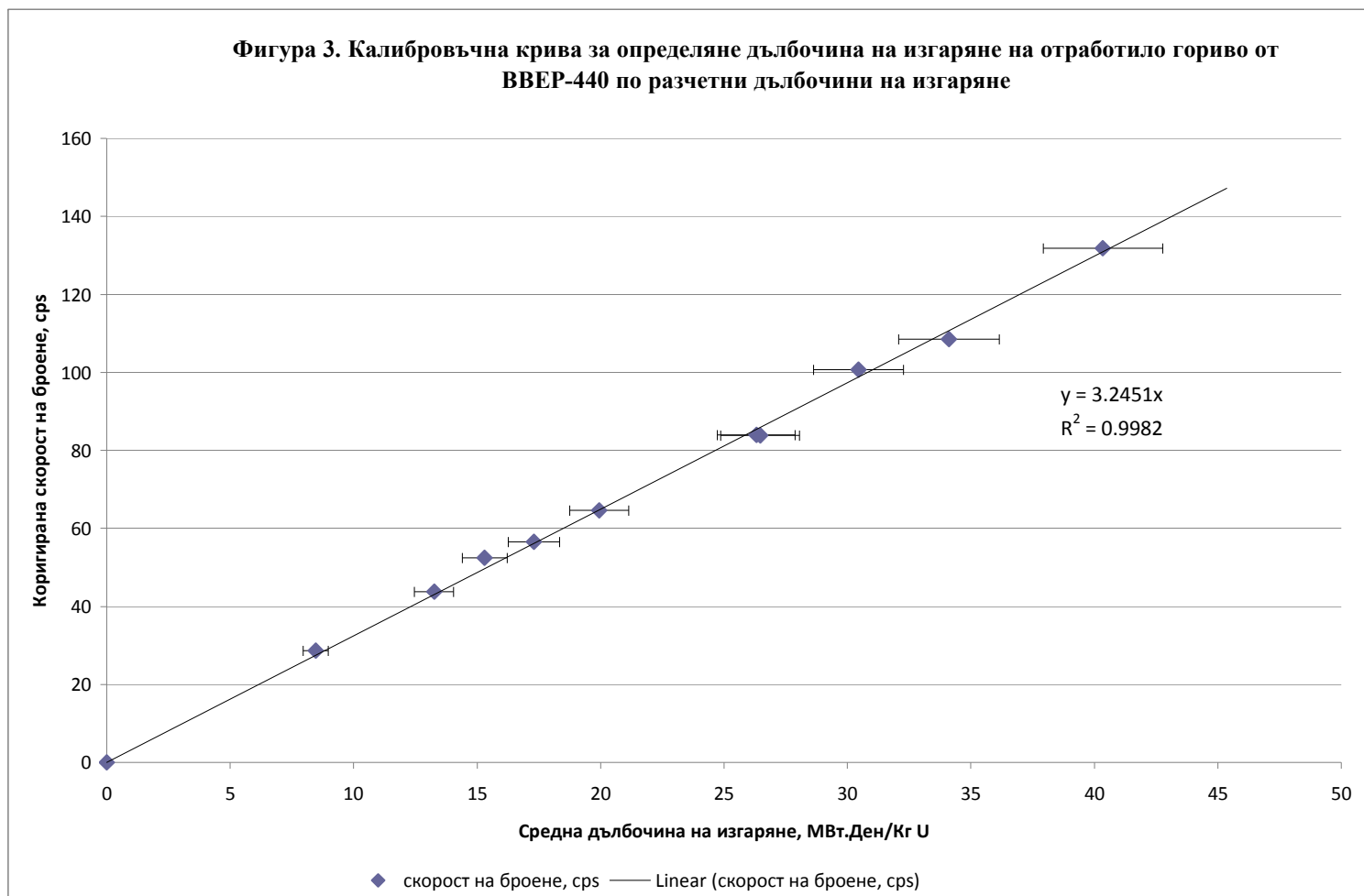
КАЛИБРИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ДЪЛБОЧИНАТА НА ИЗГАРЯНЕ НА ОЯГ ОТ ВВЕР-440 В ХОГ НА АЕЦ “КОЗЛОДУЙ”

- **Резултати от калибрирането**
 - Построена е калибровъчната крива за Cs-137 по пресметнатите дълбочини на изгаряне от данните за експлоатация на горивото. На фигурата са обозначени неопределеностите на пресметнатите дълбочини на изгаряне съгласно данните за експлоатация на горивото. Получена е калибровъчната зависимост, като коефициента на корелация е близък до 1, което показва добро съгласуване на получената зависимост с данните от измерването. Резултата от калибрирането е показан на фигура 3.





КАЛИБРИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ДЪЛБОЧИНАТА НА ИЗГАРЯНЕ НА ОЯГ ОТ ВВЕР-440 В ХОГ НА АЕЦ "КОЗЛОДУЙ"





КАЛИБРИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ДЪЛБОЧИНАТА НА ИЗГАРЯНЕ НА ОЯГ ОТ ВВЕР-440 В ХОГ НА АЕЦ “КОЗЛОДУЙ”

- **Резултати от проверката на калибровката**
 - Определени са дълбочините на изгаряне по резултатите от измерването по отношението на активностите на Cs-134 към Cs-137 за касетите, за които това отношение е измерено с приемлива неопределеност.
 - Определените по резултатите от измерването дълбочини на изгаряне са показани в таблица 4.
 - Построена е калибровъчната крива по Cs-137 и дълбочините на изгаряне, определени по отношението на активностите на Cs-134 към Cs-137, като е отчетено и отношението на дълбочината на изгаряне в областта на измерване към средната дълбочина на изгаряне на касетата. За получената калибровъчната зависимост, коефициента на корелация е близък до 1, което показва добро съгласуване на получената зависимост с данните от измерването.
 - Резултата от калибрирането е показан на фигура 4.

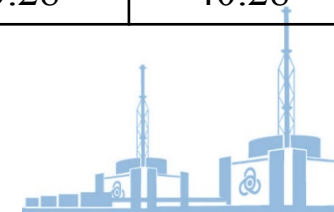




КАЛИБРИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ДЪЛБОЧИНАТА НА ИЗГАРЯНЕ НА ОЯГ ОТ ВВЕР-440 В ХОГ НА АЕЦ “КОЗЛОДУЙ”

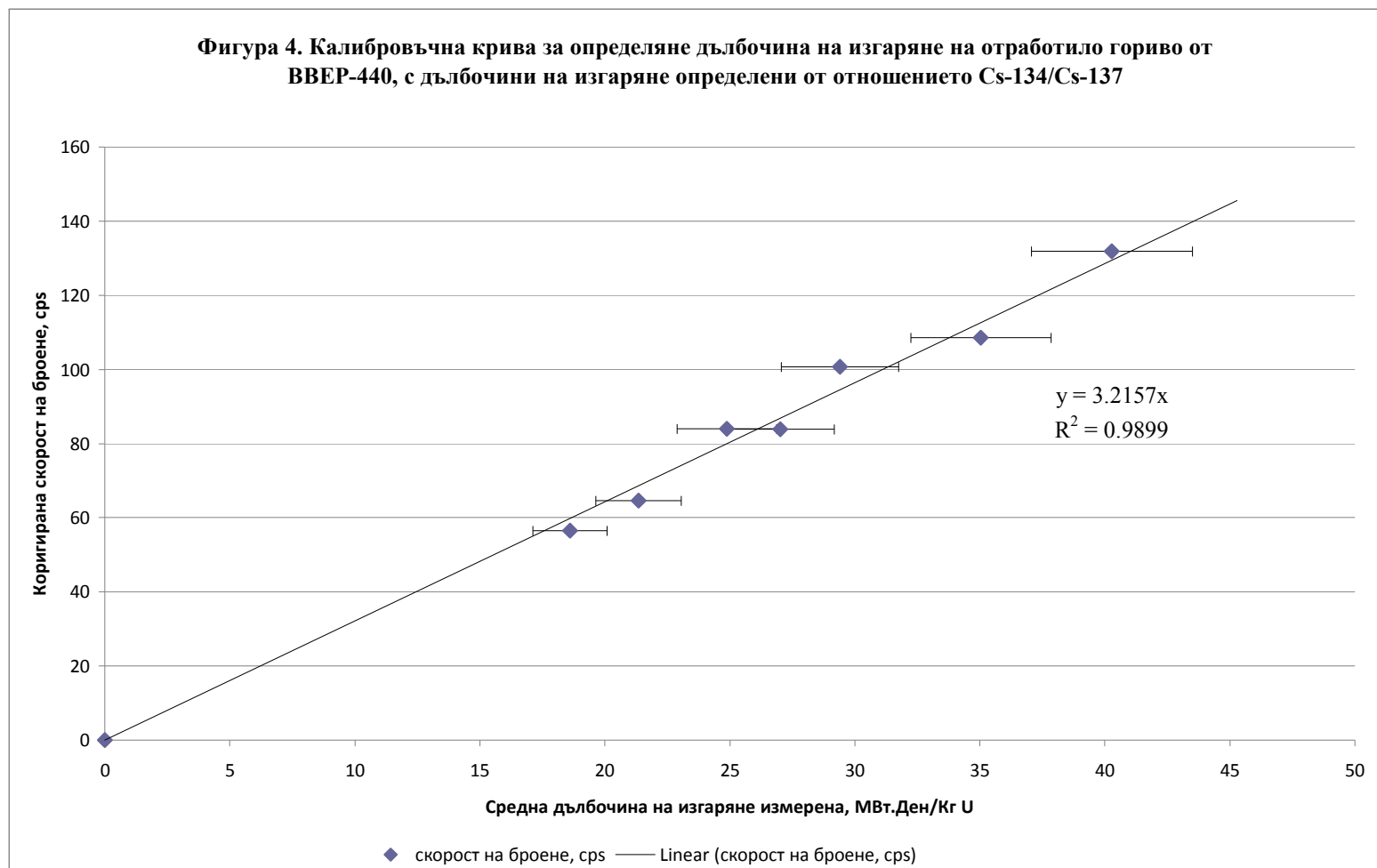
Таблица 4

касета	I_{Cs137} , cps	dI_{Cs137} , %	I_{Cs134} , cps	dI_{Cs134} , %	$K_{Cs4/Cs7}$	$dK_{Cs4/Cs7}$, %	$BV_{изм.9}$ МВт.ден/ кгU
-	0	0	0	0	0	0	0
К4	56.56	0.66	79.86	4.5	1.41	4.55	18.61
К5	64.6	0.54	105.51	3.3	1.63	3.34	21.34
К6	83.94	0.6	132.54	4.31	1.58	4.35	24.87
К7	83.85	0.49	119.89	22.14	1.43	22.15	27.02
К 8	100.72	0.51	207.7	3.16	2.06	3.2	29.4
К9	108.54	0.48	232.87	3.15	2.15	3.19	35.04
К10	131.87	0.46	294.64	3.25	2.23	3.28	40.28





КАЛИБРИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ДЪЛБОЧИНАТА НА ИЗГАРЯНЕ НА ОЯГ ОТ ВВЕР-440 В ХОГ НА АЕЦ “КОЗЛОДУЙ”





КАЛИБРИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ДЪЛБОЧИНАТА НА ИЗГАРЯНЕ НА ОЯГ ОТ ВВЕР-440 В ХОГ НА АЕЦ “КОЗЛОДУЙ”

- **Резултати от проверката на калибровката**
 - Сравнени са получените калибровъчни криви. Установено е, че разликата между тях е около 1%, което изпълнява заложените критерии за приложимост на получената калибровъчна крива.





КАЛИБРИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ДЪЛБОЧИНАТА НА ИЗГАРЯНЕ НА ОЯГ ОТ ВВЕР-440 В ХОГ НА АЕЦ “КОЗЛОДУЙ”

- **Неопределеност на резултатите от измерването.**
Неопределеността на резултата от измерването d се формира от следните компоненти:
 - неопределеност на скоростта на броене d_i – 1%
 - неопределеност на позиционирането на касетата d_p – 1.5%
 - неопределеност от отношението на дълбочината на изгаряне в мястото на измерване към средната по касетата d_{Burel} – 2%
 - неопределеност на данните за дълбочина на изгаряне за калибриране d_{Bu} – 6%
 - неопределеност на скоростта на броене при калибриране d_{ik} – 1%





КАЛИБРИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ДЪЛБОЧИНАТА НА ИЗГАРЯНЕ НА ОЯГ ОТ ВВЕР-440 В ХОГ НА АЕЦ “КОЗЛОДУЙ”

- **Неопределеност на резултатите от измерването**
 - За неопределеността на измерването получаваме:

$$d = \sqrt{2 * d_p^2 + d_i^2 + d_{ik}^2 + d_{Burel}^2 + d_{Bu}^2} \approx 7\%$$

Всички неопределености са дадени за доверителен интервал 1σ .

Стойностите са определени за случая на две измервания на касета – в щатно положение и завъртяна на 180° .





КАЛИБРИРАНЕ НА СИСТЕМА ЗА ИЗМЕРВАНЕ НА ДЪЛБОЧИНАТА НА ИЗГАРЯНЕ НА ОЯГ ОТ ВВЕР-440 В ХОГ НА АЕЦ “КОЗЛОДУЙ”

Заклучение

Системата за измерване на дълбочината на изгаряне на ОЯГ от реактори ВВЕР-440 в ХОГ на АЕЦ “Козлодуй” е калибрирана и позволява измерване на средна дълбочина на изгаряне по касета при извършване на две измервания на касета – в щатно положение и завъртяна на 180° . За целите на оценката на допустимостта на зареждане на касетите в контейнер за сухо съхранение е достатъчно измерване само в едно положение на касетата, водещо до систематично отклонение до 20%, което е приемливо от гледна точка на допустимата за зареждане дълбочина на изгаряне .





БЛАГОДАРЯ ЗА ВНИМАНИЕТО!