

## **МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ В ОБЪЕМЕ ТОПЛИВОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ ПОМЕЩЕНИЯ 305/2 ОБЪЕКТА «УКРЫТИЕ»**

**В. Н. Павлович, В. А. Бабенко, Е. Д. Высотский, А. А. Ключников, В. Г. Шевченко**

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев  
Институт проблем безопасности НАН Украины, Чернобыль*

Предлагается версия трехмерной модели размещения, состава и массовой доли химических элементов в скоплениях топливосодержащих материалов помещения 305/2 объекта «Укрытие». Приводятся результаты расчета распределения плотности потока нейтронов (ППН) полученные с помощью программы MCNP-4C. Результаты расчета сопоставляются с данными прямых измерений ППН.

### **Введение**

Изменение уровня подкритичности топливосодержащих материалов (ТСМ) в местах, в которых предполагается размещение зон критмассового риска (КМЗ) может оцениваться только по результатам интерпретации относительных изменений измеряемых во времени значений ППН. Эти изменения несут информацию о динамике мощности источника нейтронов, которым и является КМЗ, находящаяся в массиве ТСМ.

Блоки детектирования нейтронных каналов систем контроля располагаются на периферии ТСМ и регистрируют как нейтроны утечки из удаленного объема КМЗ, так и постоянный нейтронный фон от окружающих ТСМ. Для оценки ожидаемого превышения сигнала от источника над фоновой составляющей в показаниях нейтронных детекторов были проведены модельные расчеты распределения ППН в объеме ТСМ помещения 305/2. В этом помещении в настоящее время определены и идентифицированы как КМЗ риска объемы ТСМ, находящиеся в районе пролома стены между помещениями 305/2 и 304/3 и в районе 4-го паросбросного клапана.

Для расчетов была использована многофункциональная программа решения задач переноса нейтронов методом Монте-Карло в трехмерных материальных системах MCNP-4C.

### **Представление объема ТСМ**

Главным вопросом при расчете характеристик ТСМ является вопрос о количестве и расположении топлива в рассматриваемом помещении. В качестве исходных данных для расчетов использовались данные отчета [1], полученные с использованием комплексного визуально-аналитического метода. Основой этого метода являются как прямые визуальные наблюдения многих исследователей и обобщение этих наблюдений, так и совмещение и наложение этих наблюдений на объективные данные - результаты химического анализа кернов, измерения мощности экспозиционной дозы (МЭД) гамма-излучения при бурении, а также на результаты теле- и видеосъемок.

Применение визуально-аналитического метода для изучения помещения 305/2 позволило получить альбом профилей его поперечных сечений через достаточно малые расстояния. На основании этих сечений была построена подробная трехмерная компьютерная модель взаимного расположения основных элементов в изучаемом помещении [1]. На сегодняшний день данная модель является наиболее детальной и реалистической моделью размещения ТСМ и других элементов в помещении 305/2. Согласно этой модели весь объем рассматриваемого помещения был разбит на отдельные колонны-квартиры с площадью основания  $2 \times 2$  м и высотой, определяемой соответствующими поперечными сечениями, профили которых представлены в [1]. Таких квартир оказалось 144 - по 12 квартир, расположенных в 12 рядах. При сложном профиле "потолка" квартиры делались соответствующие упрощения. В каждой квартире вычислялся объем, приходящийся только на ТСМ, плотность и концентрацию в них урана. При этом особо следует подчеркнуть, что используемые значения количества топлива являются минимально возможными [1].

### Элементный состав ТСМ

По своим внешним признакам ТСМ, как известно, могут быть разделены на два основных типа, а именно на так называемые черную и коричневую керамики. Элементный состав и массовая доля различных элементов в составе черной и коричневой керамик были взяты из отчета [2] и приведены в табл. 1 и 2. В табл. 3 приведено описание химических смесей, используемых при расчетах. При этом плотность соответствующей керамической смеси и концентрация в ней топлива  $UO_2$  взяты из работы [1]. Среднее обогащение урана по изотопу  $^{235}U$  выбиралось для первоначальных расчетов равным 1 %, содержание изотопов плутония не учитывалось.

Таблица 1. Элементный состав коричневой керамики<sup>1</sup>

Химический элемент	Массовая доля, %		
	Среднее значение	Стандартное значение	Интервал значений
Si	30	4,9	-
Ca	4,8	1,1	-
Ti	$14,5 \cdot 10^{-2}$	$4,5 \cdot 10^{-2}$	-
Zr	4,9	1,2	-
Cu	-	-	$(1,5 \div 18) \cdot 10^{-3}$
Na	4,0	0,4	-
Ba	$1,7 \cdot 10^{-1}$	$3,0 \cdot 10^{-2}$	-
Al	3,6	0,8	-
Mn	$4,1 \cdot 10^{-1}$	$1,7 \cdot 10^{-1}$	-
Fe	$8,9 \cdot 10^{-1}$	$2,0 \cdot 10^{-1}$	-
Mg	4,2	1,0	-
Pb	-	-	$(4,8 \div 180) \cdot 10^{-3}$
Cr	$2,7 \cdot 10^{-1}$	$9,0 \cdot 10^{-2}$	-
Ni	$2,8 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$	-
B	$6,5 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	-

Таблица 2. Элементный состав черной керамики

Химический элемент	Массовая доля, %		
	Среднее значение	Стандартное значение	Интервал значений
Si	28	3,5	-
Ca	4,5	1,9	-
Ti	$11 \cdot 10^{-2}$	$4,0 \cdot 10^{-2}$	-
Zr	4,0	1,2	-
Cu	-	-	$(1,3 \div 34) \cdot 10^{-3}$
Na	3,9	1,4	-
Ba	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$0,6 \cdot 10^{-1}$	-
Al	4,0	0,7	-
Mn	$3,1 \cdot 10^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-1}$	-
Fe	-	-	0,6÷8,5
Mg	3,0	0,4	-
Pb	-	-	$(1,5 \div 180) \cdot 10^{-3}$
Cr	$2,6 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{-1}$	-
Ni	-	-	$(1,4 \div 7,4) \cdot 10^{-1}$
B	$4,5 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	-

<sup>1</sup> Кроме перечисленных элементов в составе керамики присутствует кислород. С его учетом, а также с учетом топлива сумма всех массовых долей элементов составляет 100 %.

Таблица 3. Химические смеси, используемые при расчетах

Номер химической смеси	Тип химической смеси	Плотность смеси, г/см <sup>3</sup>	Весовая концентрация топлива UO <sub>2</sub> , %
1	воздух	$1,2928 \cdot 10^{-3}$	-
2	черная керамика	2,3	5
3	коричневая керамика	2,7	7
4	коричневая керамика	2,7	10
5	коричневая керамика	2,5	8
6	коричневая керамика	2,5	7
7	черная керамика	2,5	5
8	черная керамика	1,25	5
9	черная керамика	1,15	4

### Трехмерная модель ТСМ

Из-за отсутствия данных для реальных расчетов использовались данные только по первым 84 квартирам ТСМ, расположенным в первых семи рядах. При этом даже в этих рядах отсутствуют данные по многим квартирам, которые вследствие этого считаются "условно пустыми". На рис. 1 приведена нумерация квартир при проведенном разбиении объема помещения 305/2 на отдельные квартиры, а на рис. 2 приведена картограмма заполнения квартир соответствующими керамическими смесями из табл. 3. Пустые квартиры условно обозначены на рис. 2 прочерком. На начальном этапе исследования была принята упрощенная модель размещения ТСМ, в которой каждая квартира с площадью основания 2 × 2 м представлялась в виде соответствующего прямоугольного параллелепипеда с высотой, определяемой объемом ТСМ, содержащихся в квартире. На рис. 3 приведена соответствующая трехмерная геометрическая модель размещения ТСМ. Также следует отметить, что в данной упрощенной модели размещения ТСМ не учтено наличие в помещении 305/2 бетонных отражателей - пола, стен и потолка.

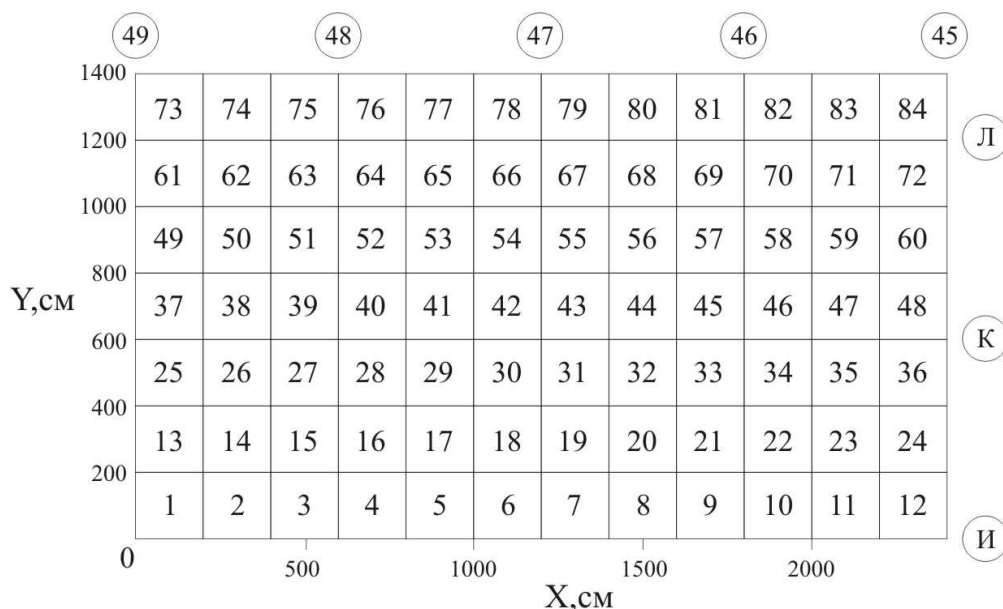


Рис. 1. Нумерация квартир при проведенном разбиении объема помещения 305/2 на отдельные квартиры.

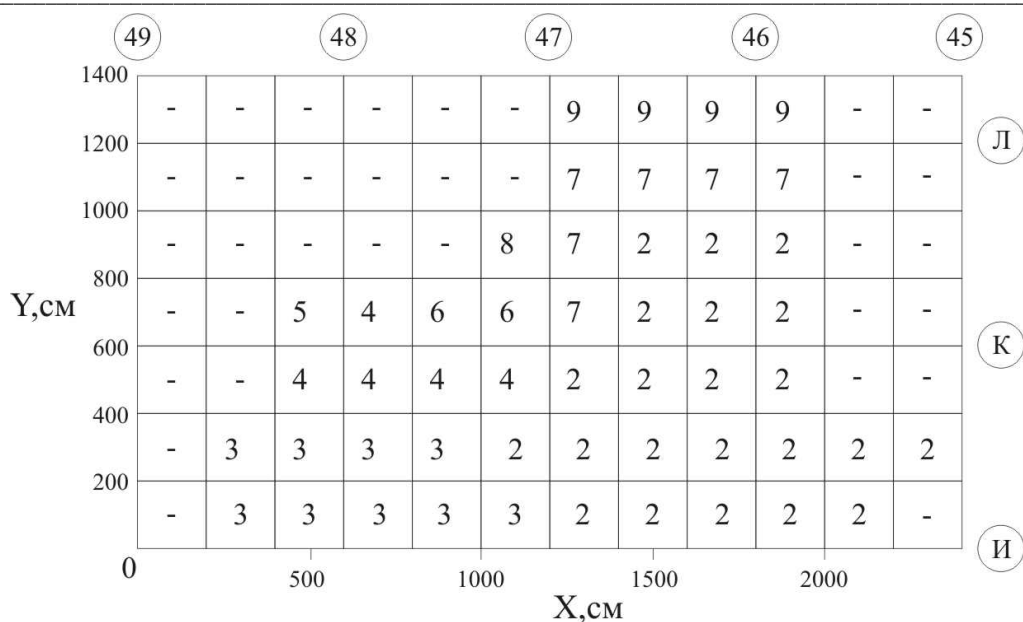


Рис. 2. Картограмма заполнения квартир соответствующими керамическими смесями из табл. 3.

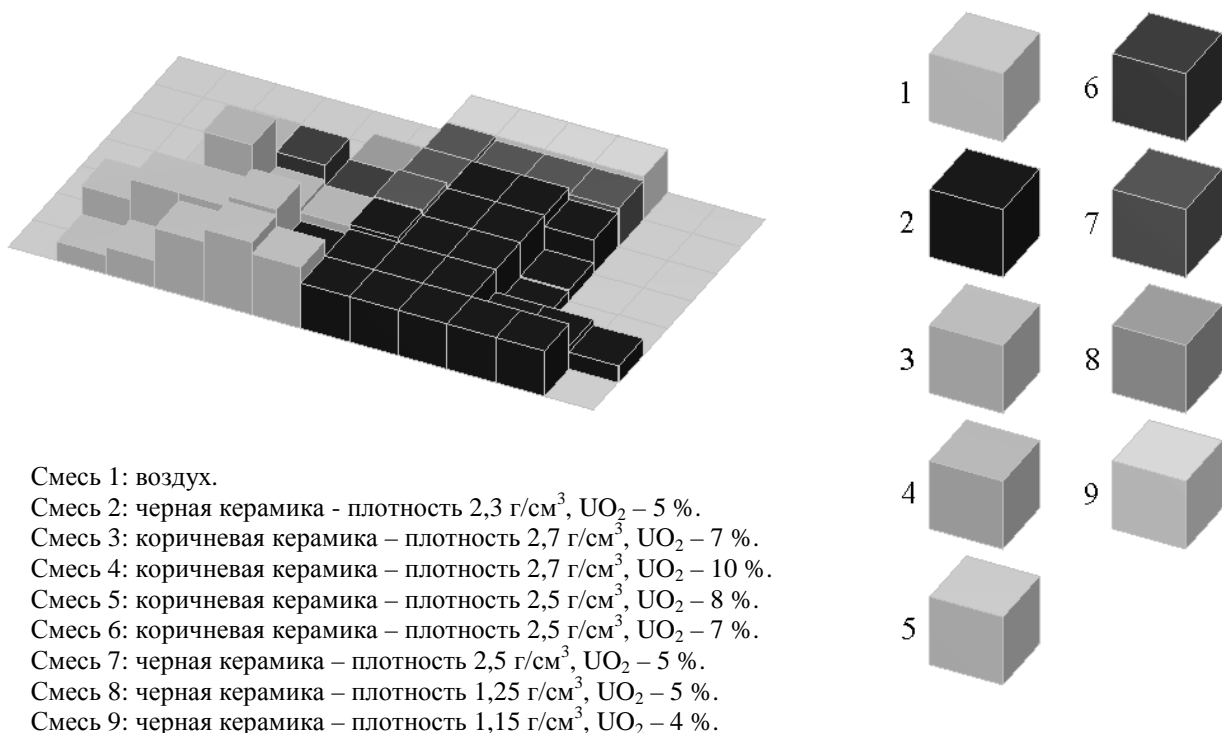


Рис. 3. Трехмерная геометрическая модель размещения ТСМ в помещении 305/2 с указанием номеров и типа соответствующих керамических смесей из табл. 3.

### Модельные расчеты

Расчет эффективного коэффициента размножения Кэф для рассматриваемой модели ТСМ был проведен с помощью программных кодов SCALE-4.4a и MCNP-4C. Оба расчета с высокой степенью точности дали для эффективного коэффициента размножения одинаковый результат Кэф = 0,075. Таким образом, система в данной модели является глубоко подкритической.

Расчет ППН в квартирах ТСМ помещения 305/2 был осуществлен с помощью программы MCNP-4C. Пространственное распределение внешних источников нейтронов при

этом выбиралось равномерным по всему объему делящегося вещества (ТСМ), а их активность на 1 г урана была принята равной  $A = 15$  н/с. В энергетическом спектре внешних источников нейтронов учитывался равномерно распределенный вклад от спонтанного деления кюрия  $^{242}\text{Cm}$ , образующегося при распаде  $^{242\text{m}}\text{Am} \rightarrow ^{242}\text{Am} \rightarrow ^{242}\text{Cm}$  и от  $(\alpha, n)$ -реакции на кислороде. Удельная активность  $^{242\text{m}}\text{Am}$  на момент аварии составляла  $(3,8 \pm 0,5)10^4$  Бк/гU [3]. При этом спектр  $(\alpha, n)$ -реакции в первоначальных расчетах был принят для простоты монохроматическим с энергией  $E_0 = 5,5$  МэВ, а энергетический спектр деления кюрия был выбран в виде спектра деления Уатта

$$p(E) = C \exp(-E/a) \text{sh}(bE)^{1/2},$$

где значения коэффициентов распределения для элемента  $^{242}\text{Cm}$  были взяты из таблиц и равны

$$a = 0,891 \text{ МэВ}, b = 4,046 \text{ МэВ}^{-1}.$$

Результаты по рассчитанному распределению потока нейтронов в помещении 305/2 приведены в табл. 4. Из табл. 4 видно, что максимальный поток нейтронов наблюдается в 28-й, 29-й и 30-й квартирах, где размещена смесь № 4 - коричневая керамика с плотностью  $2,7 \text{ г/см}^3$ .

Таблица 4. Средняя ППН в квартирах ТСМ помещения 305/2, рассчитанная с помощью программы MCNP-4C

Номер квартиры	Средняя ППН в квартире $\bar{\Phi}$ , н/см <sup>2</sup> ·с	Номер квартиры	Средняя ППН в квартире $\bar{\Phi}$ , н/см <sup>2</sup> ·с	Номер квартиры	Средняя ППН в квартире $\bar{\Phi}$ , н/см <sup>2</sup> ·с
1	-	22	474.0	46	230.9
2	587.3	23	441.0	47-53	-
3	753.8	24	299.7	54	418.1
4	907.0	25, 26	-	55	693.3
5	951.2	27	821.7	56	685.5
6	882.3	28	1321.0	57	661.5
7	637.5	29	1437.2	58	523.0
8	618.9	30	1343.2	59-66	-
9	614.9	31	742.4	67	610.6
10	578.2	32	693.5	68	664.4
11	518.5	33	627.5	69	662.7
12, 13	-	34	204.3	70	590.0
14	779.5	35-38	-	71-78	-
15	904.6	39	739.0	79	284.7
16	1075.9	40	1292.0	80	335.3
17	1004.3	41	955.6	81	335.7
18	753.9	42	963.7	82	278.7
19	691.8	43	727.3	83,84	--
20	693.4	44	694.3		
21	647.9	45	628.8		

При этом квартира 28 имеет также наибольшую высоту среди остальных, достигающую 4,5 м, и в этой квартире соответственно наибольший объем и масса ТСМ. Наибольшее же значение потока нейтронов имеется в квартире 29 и составляет величину  $\Phi_{29} = 1437,2 \text{ н/см}^2 \cdot \text{с}$ . Средний поток нейтронов во всем объеме ТСМ имеет при этом примерно в два раза меньшее значение  $\bar{\Phi} = 770,7 \text{ н/см}^2 \cdot \text{с}$ .

На рис. 4 приведено трехмерное графическое изображение распределения ППН по квартирам. Интересующие нас участки в районе пролома стены (координаты И÷И<sub>+2000</sub>; 46÷47) моделируются восемью квартирами, это квартиры 7 – 11 и 19 - 22. Средняя расчетная ППН в этом районе составила 500 - 700 н/см<sup>2</sup>·с. Измерения ППН, полученные детектором,

установленном над поверхностью ТСМ в этом районе на расстоянии 0,8 м дают значение ППН 300 - 400 н/см<sup>2</sup>·с при расчетном ослаблении 1,33/2,69.

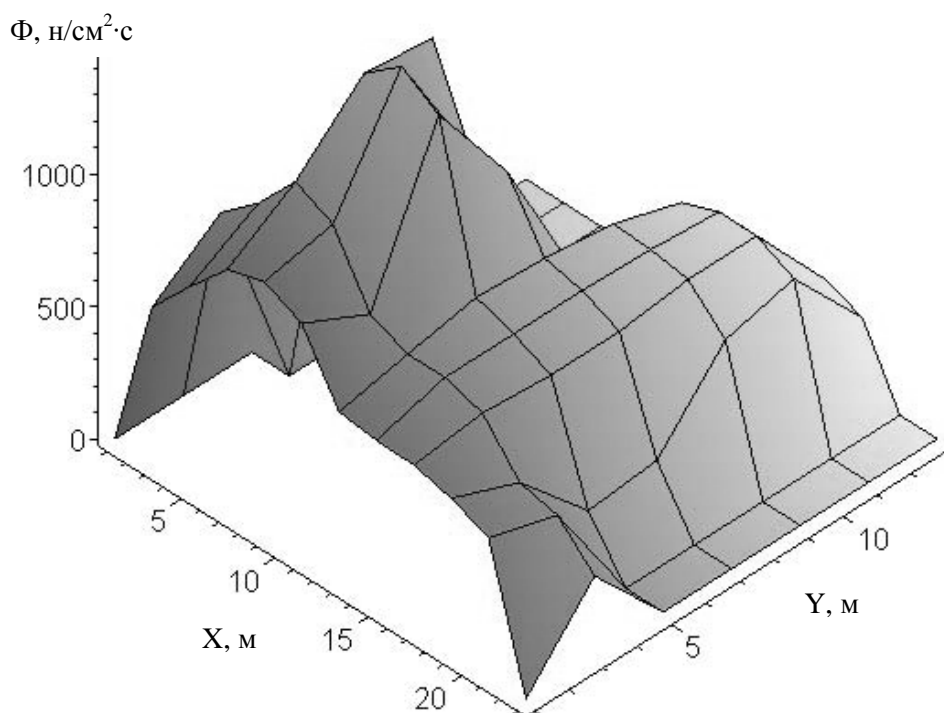


Рис. 4. Распределение ППН по квартирам помещения 305/5.

### Выводы

1. При построении пространственной модели размещения ТСМ в помещении 305/2 в качестве исходных данных использовались последние результаты исследований характеристик ТСМ. Это результаты теле- и видеосъемок, результаты химического анализа проб и данные прямых измерений МЭД и ППН.

2. Результаты расчетов распределения ППН можно считать удовлетворительными, так как они имеют тот же порядок, что и результаты прямых измерений ППН на периферии ТСМ.

3. Геометрия модели должна быть расширена для охвата района пролома со стороны помещения 304/3, а также со стороны нижнего перекрытия помещений 305/2 и 304/3. Объем модели должен охватывать также места расположения нейтронных детекторов.

4. В следующей версии модели необходимо задать внешний объемный источник нейтронов, имитирующий КМЗ с изменяющимся уровнем подкритичности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Заключительный отчет по договору № ЗУ-97 "Создание чертежей разрезов подапаратного помещения 4-го блока ЧАЭС и разработка их компьютерной версии. Оценка количества топлива в этом помещении"*. - Санкт-Петербург – Чернобыль, 1997.
2. *Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации: (Отчет о НИР) / МНТЦ «Укрытие» НАН Украины; Руководитель темы А. А. Боровой. – Арх. № 3836. - Чернобыль, 2001.*
3. *Агеев В.А., Выричек С.Л., Ключников А.А. и др. Оценка содержания <sup>242m</sup>Am в топливе 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС // АЭ. – Т.84, вып. 4. – С. 340 - 344.*

Поступила в редакцию 05.04.05,  
после доработки - 13.04.05.

**7 22 МОДЕЛЬ РОЗПОДІЛУ ЩІЛЬНОСТІ ПОТОКУ НЕЙТРОНІВ  
В ОБ'ЄМІ ПАЛИВОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИМІЩЕННЯ 305/2 ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ»****В. М. Павлович, В. О. Бабенко, Є. Д. Висотський, О. О. Ключников, В. Г. Шевченко**

Пропонується версія тривимірної моделі розміщення, складу й масової долі хімічних елементів в об'ємі скупчень паливовмісних матеріалів приміщення 305/2 об'єкта «Укриття». Наведено результати розрахунку розподілу щільності потоку нейтронів (ЩПН), отримані за допомогою програми MCNP-4C. Результати розрахунку зіставляються з даними прямих вимірювань ЩПН.

**7 22 MODEL OF NEUTRON FLOW DENSITY DISTRIBUTION IN FUEL CONTAINING MATERIALS  
OF OBJECT "UKRYTTYA" ROOM 305/2****V. N. Pavlovich, V. A. Babenko, E. D. Vysotskiy, A. A. Klyuchnikov, V. G. Shevchenko**

The version of three-dimensional model of location, structure, and fraction of total mass of chemical elements in FCM accumulations of Object "Ukryttya" Room 305/2 is proposed. Calculation results of neutron flow density (NFD) distribution obtained using the Program MCNP-4C are represented. Calculation results are compared with data of direct measurements of NFD.