

УДК 621.039.586

## РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Жагипарова Л.К., Котов В.М.

*Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

В статье представлено расчетное исследование нейтронно-физических характеристик экспериментального устройства (ЭУ), предназначенного для имитации остаточного энерговыделения в расплаве ловушки за счет нейтронного облучения [1]. Проведены расчетные определения отношения энерговыделения в расплаве в различных вариантах наполнения ловушки к энерговыделению в реакторе. Выработаны предложения по оптимальному проведению физического пуска.

### ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение безопасности эксплуатации ядерных реакторов является одной из важнейших задач атомной энергетики. Для решения вопросов, связанных с безопасностью энергетических реакторов, проводится большой объем работ, включающих в себя как теоретические, так и экспериментальные исследования.

На протяжении нескольких лет в Институте атомной энергии проводится анализ безопасности реакторных установок. Одной из основных целей таких работ на реакторе ИГР является изучение процессов, связанных с плавлением элементов теплоделяющих сборок (ТВС) в результате тяжелой аварии реакторов на быстрых нейтронах.

Одним из важных факторов при этом является влияние остаточного энерговыделения в расплавленном топливе, вышедшем из активной зоны реактора. Ограничение интеграла энерговыделения в ИГР формирует особенности таких экспериментов. Так, остаточное энерговыделение моделируется облучением расплава топлива нейтронами реактора. В начальной стадии эксперимента расплав образуется из ТВС реактора и перемещается в графитовую ловушку, расположенную ниже пространства ТВС.

Создание требуемого энерговыделения в расплаве ловушки требует проведения комплекса расчетных и экспериментальных работ. Сложности этой задачи связаны с тем, что при традиционном размещении ТВС с совмещением ее центра с центром активной зоны, ловушка попадает в зону с малым потоком нейтронов. Для решения этой проблемы принято поднимать ТВС над центром активной зоны ИГР. Это, в свою очередь, создает новые проблемы: усиливается влияние положения стержней регулирования ИГР на поток в месте размещения ловушки, создается существенное различие в потоках нейтронов горячего реактора (в ходе эксперимента) и холодного (в ходе контрольного физического пуска).

В данной статье представлены расчетные и экспериментальные работы, позволившие определить условия проведения эксперимента с моделированием остаточного энерговыделения в расплаве топлива, попавшем в ловушку.

### 1. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основные элементы конструкции экспериментального устройства представлены на рисунке 1 [2]. В его состав входят неподвижная ампула НА-290, ТВС в несущем чехле, графитовая ловушка расплава, вторая ловушка, обеспечивающая требуемую безопасность проведения работ, надежность экспериментального устройства и реактора в ходе проведения эксперимента.

Ловушка расплава, предназначенная для приема расплава топлива, размещена под активной зоной реактора ИГР, отметка «-849 мм» соответствует днищу ловушки (рисунок 1).

В чехле размещена ТВС, представляющая собой двухрядную сборку из 54 твэлов (рисунок 2). В твэлах установлены топливные таблетки реактора БН-350 из диоксида урана с обогащением 17 % в активной части и с содержанием  $^{235}\text{U}$  – 0,27 % в бланкетной части топливного столба (таблица 1). Центр топливного столба ТВС смещен на 500 мм выше центра активной зоны реактора. Сам чехол является барьером, снижающим тепловое воздействие на неподвижную ампулу и предотвращающим контактное взаимодействие топлива с нею.

### 2. ЗАДАЧИ РАСЧЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как указано во введении, эксперимент с имитацией энерговыделения в ловушке расплава осложнен рядом факторов:

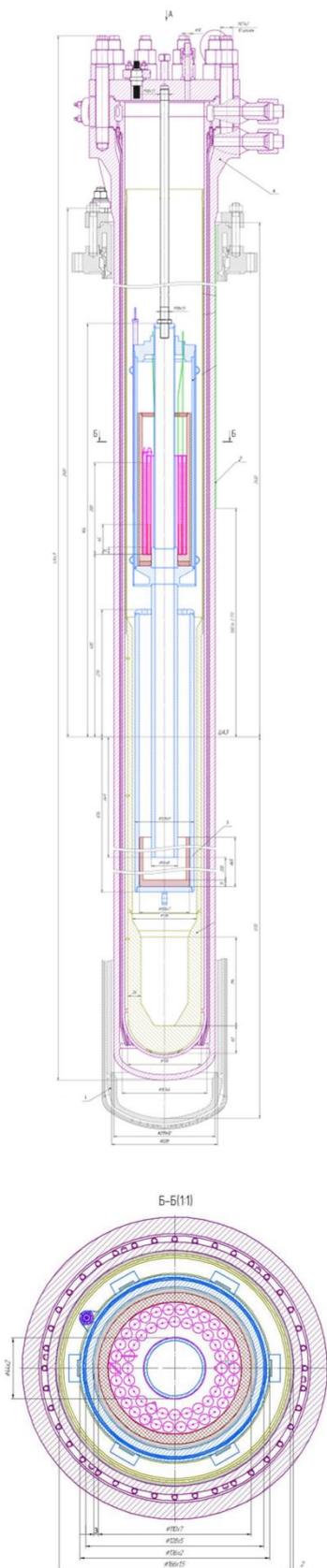
- ловушка расплава находится ниже активной зоны реактора ИГР;
- расплав топлива попадает в ловушку после прохождения значительной части эксперимента, когда кладка реактора существенно разогревается;
- в момент падения расплава, управляющие стержни реактора подняты из нижнего положения, искажая высотное распределение поле нейтронов в реакторе против начального.

Таким образом, для корректного определения энерговыделения в расплаве необходимо проведение ряда нейтронно-физических расчетов и сравнительного эксперимента – аналога одного из расчетов.

**РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА**

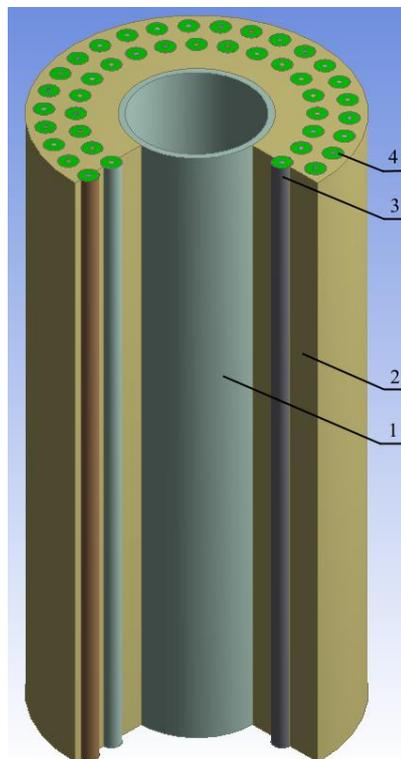
*Таблица 1. Технические характеристики ТВС*

Наименование параметра	Значение
Топливо	диоксид урана
Содержание $^{235}\text{U}$ в топливе, %	
– в активной части	17
– в бланкетной части	0,27
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	9700 ±10300
Наружный диаметр топливной таблетки, мм	5,9±0,02
Внутренний диаметр топливной таблетки, мм	1,5±0,1
Длина топливного столба, мм	200
Длина активной части топливного столба наружного ряда, не менее, мм	185
Длина активной части топливного столба внутреннего ряда, не менее, мм	135
Длина бланкетной части топливного столба наружного ряда, не более, мм	15
Длина бланкетной части топливного столба внутреннего ряда, не более, мм	65
Материал оболочки	12X18H10T
Наружный диаметр оболочки, мм	8
Внутренний диаметр оболочки, мм	6
Масса топливных таблеток в ТВС, кг	2,734



1 – неподвижная ампула; 2 – чехол ТВС; 3 – ловушка расплава

*Рисунок 1. Экспериментальное устройство*



1 – направляющая стальная труба; 2 – газовая среда чехла ТВС;  
3 – внутренний ряд твэлов; 4 – наружный ряд твэлов

*Рисунок 2. Разрез модельной ТВС*

Был выбран следующий ряд расчетных ситуаций:

- физический пуск с полным набором топлива в виде стержневых ТВЭлов;
- физический пуск с полным набором топлива в виде стержневых ТВЭлов, высота стержневых ТВЭлов равна высоте гомогенного расплава;
- физический пуск с полным набором топлива при имитации расплава горячими стержневыми ТВЭлами;
- горячий пуск с полным набором топлива при имитации расплава горячими стержневыми ТВЭлами;
- горячий пуск с полным переливом топлива (гомогенный расплав);
- горячий пуск с переливом половины топлива (гомогенный расплав);
- физический пуск с шестью таблетками.

В эксперименте проверялась ситуация физического пуска с шестью таблетками.

### 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ

Нейтронно-физические расчеты выполнены при помощи программы MCNP5 [3], с использованием модели реактора ИГР [4].

Расчетная модель реактора ИГР максимально приближена к реальной конструкции реактора: заданы зазоры между колоннами кладки в активной зоне и в отражателе, задана переменная концентрация урана по топливным блокам. Разработанная модель учитывает:

- перемещение стержней регулирования в ходе пуска;
- динамику работы реактора с учетом неравномерности нагрева отдельных частей кладки.

Активная зона, боковой, нижний, верхний и подвесной отражатели реактора ИГР в расчетной модели представлены блочной структурой. В расчетной модели реактора ИГР в ЦЭКе смоделирован макет устройства. Модель устройства максимально приближена к реальной конструкции ЭУ.

В результате проведенных расчетов вычислено отношение энерговыделения в топливе к энерговыделению в реакторе по формуле (1):

$$k = \frac{q}{Q} \cdot \frac{1}{m} \quad (1)$$

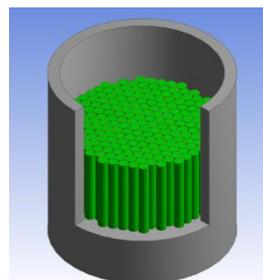
где:  $q$  – энерговыделение в топливе, о.е.;  
 $Q$  – энерговыделение в реакторе ИГР, о.е.;  
 $m$  – масса топлива, г.

### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

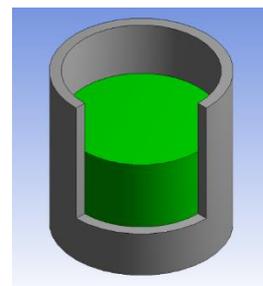
Состояние реактора близкое к критическому, достигается соответствием температуры кладки и положением управляющих стержней.

Расплав в ловушке ЭУ рассмотрен в виде стержневых ТВЭлов (расчеты номер 1–4 и рисунок 3, а), гомогенного расплава (расчеты номер 5 и 6, рисунок 3, б) и в виде таблеток (расчет номер 7 и рисунок 3, в).

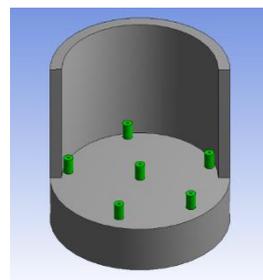
В расчетах в № 1, 3, 4, 5 масса топлива в ловушке соответствует массе топлива с обогащением 17 % в чехле ТВС (таблица 2, рисунок 3). В расчете № 2 высота стержневых ТВЭлов соответствует высоте гомогенного расплава в ловушке расплава (таблица 2, рисунок 3). В расчете № 6 масса топлива в ловушке соответствует половине массы топлива с обогащением 17 % в чехле ТВС (таблица 2, рисунок 3). В расчете № 7 смоделированы таблетки типа БН-350 из диоксида урана с обогащением 17 % по  $^{235}\text{U}$  высотой 10 мм в ловушке расплава (таблица 2, рисунок 3).



а) расчеты № 1, 2, 3, 4



б) расчеты № 5, 6



в) расчет № 7

Рисунок 3. Ловушка с различными видами расплава

Проведены расчеты нейтронно-физических характеристик устройства с различными вариантами размещения расплава топлива в ловушке для горячей и холодной кладки реактора ИГР при соответствующих положениях органов регулирования. Получено отношение энерговыделения в топливе к энерговыделению в реакторе для расчетных вариантов, позволяющее определить соответствие характеристик энерговыделения на физическом и горячем пусках реактора. Результаты расчетов представлены в таблице 2.

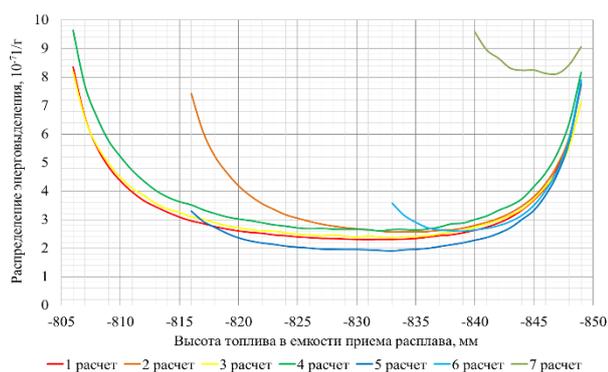
**РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА**

*Таблица 2. Параметры и результаты расчетов*

	1 расчет	2 расчет	3 расчет	4 расчет	5 расчет	6 расчет	7 расчет
Реактивность, $\beta$	0,43±0,01	0,42±0,01	0,54±0,01	1,38±0,01	0,20±0,01	0,19±0,01	0,44±0,01
Температура кладки, К	294	294	294	1200	1200	1200	294
Масса топлива с обогащением 17 % в чехле ТВС, г	2316	2316	2316	2316	0	0	2181
Энерговыведение в реакторе ИГР, о.е.	77,29	77,29	77,35	77,53	76,93	76,92	77,27
Топливо в графитовом стакане	твэлы	твэлы	твэлы	твэлы	гомогенное	гомогенное	таблетки
Температура, К	294	294	3100	3100	3100	3100	294
Высота, мм	44,2	34,6	44,2	44,2	34,6	17,3	10
Масса, г	2316	1698	2316	2316	2316	1158	14,75
Масса $^{235}\text{U}$ , г	343,51	251,97	343,51	343,51	343,51	171,81	2,52
Отношение энерговыведения в топливе к энерговыведению в реакторе, $10^{-7}$ 1/г	3,37±0,01	4,01±0,01	3,43±0,01	3,87±0,01	2,87±0,01	3,81±0,01	8,18±0,01

При увеличении температуры топлива в ловушке отношение энерговыведения в топливе к энерговыведению в реакторе увеличивается на ~1,7 % (расчеты №№ 1 и 3). При увеличении температуры кладки реактора и топлива в ловушке энерговыведение увеличивается на ~12,9% (расчеты №№ 1 и 4). При изменении вариантов размещения топлива в ловушке и при увеличении температуры топлива в ловушке и кладки реактора энерговыведение увеличивается на ~14,8% (расчеты №№ 1 и 5). При изменении вариантов размещения топлива в ловушке и при одинаковых условиях физического пуска энерговыведение в таблетках увеличивается более чем в 2 раза (расчеты №№ 1 и 7). При одинаковых условиях горячего пуска с гомогенным распределением топлива в ловушке (масса и высота топлива разные) энерговыведение меньше при большей массе топлива в ловушке.

На рисунке 4 показано распределение энерговыведения по высоте топлива в различных вариантах заполнения ловушки. Отметка «-849 мм» соответствует днищу графитового стакана ловушки расплава.



*Рисунок 4. Распределение энерговыведения по высоте топлива в различных вариантах заполнения ловушки*

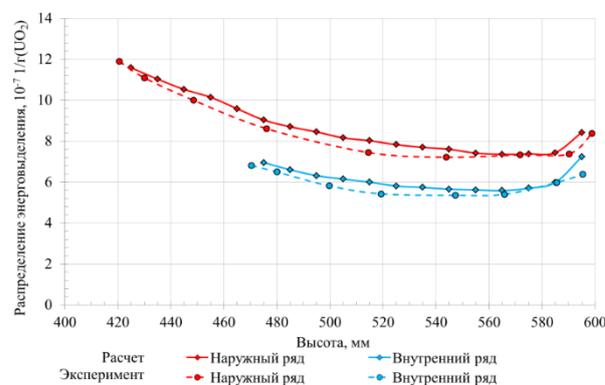
Получено соотношение энерговыведения в расплаве и активной зоне реактора для расчетных вариантов, позволяющее определить соответствие характеристик энерговыведения в различных вариантах физического и горячих пусков реактора.

Проведение физического пуска с получением представительной информации возможно при использовании вариантов стержневого наполнения ловушки расплава с полным набором топливных стержней и набором из шести топливных таблеток. Учитывая трудоемкость работ предпочтительен второй вариант.

### 5. ФИЗИЧЕСКИЙ ПУСК

Изготовлены детали и выполнена сборка физического макета экспериментального устройства для исследования параметров течения расплавленных материалов активной зоны по направляющей трубе стержня регулирования. Проведено реакторное облучение физического макета экспериментального устройства. После разборки физического макета шесть топливных таблеток из ловушки и твэлы из ТВС направлены на спектрометрические измерения активности продуктов деления.

Результаты спектрометрических измерений [4] сравнены с результатами расчетов [5]. На рисунке 5 показаны распределения энерговыведения в топливе по высоте наружного и внутреннего ряда твэлов, полученные в расчетах и в эксперименте.



*Рисунок 5. Распределение энерговыведения по высоте топлива чехла ТВС*

Рост энерговыделения в районе торцов твэлов объясняется повышенным, по сравнению с соседними областями, потоком нейтронов, обусловленным меньшим объемом топлива. Различия в уровнях энерговыделения по рядам обусловлены наличием блок-эффекта внутренних рядов твэлов наружными.

Спектрометрические [4] и расчетные [5] отношения энерговыделения в активной части топлива чехла ТВС к энерговыделению в реакторе ИГР приведены в таблице 3.

Таблица 3. Отношение энерговыделения в активной части топлива чехла ТВС к энерговыделению в реакторе ИГР

Наименование	Отношение энерговыделения активной части топлива к энерговыделению в реакторе, $1/g(UO_2) \times 10^{-7} \pm 0,001$	
	расчет	эксперимент
Наружный ряд	8,45	8,43
Внутренний ряд	5,86	5,82
Среднее значение	7,49	7,27

Схема расположения топливных таблеток в ловушке расплава показана на рисунке 6. По результатам спектрометрических измерений [4] и по результатам расчетов [5] определили отношение энерговыделения топливных таблеток в ловушке к энерговыделению реактора. Результаты спектрометрических [4] и расчетных [5] измерений показаны на рисунке 7 и в таблице 4.

Таблица 4. Отношение энерговыделения в топливных таблетках ловушки к энерговыделению в реакторе ИГР

№ табл. п/п	Положение таблетки в графитовом стакане	Отношение энерговыделения в топливных таблетках к энерговыделению в реакторе, $10^{-7} 1/g(UO_2) \pm 0,001$		Масса $UO_2$ , г $\pm 0,02$
		расчет	эксперимент	
1	центр	8,33	8,05	2,47
2	периметр	7,94	7,87	2,43
3	периметр	8,19	7,87	2,46
4	периметр	8,29	7,77	2,46
5	периметр	8,13	7,66	2,47
6	периметр	8,21	7,77	2,46
Среднее значение		8,18	7,83	-

## ВЫВОДЫ

Проведено расчетное исследование нейтронно-физических характеристик экспериментального устройства с различными вариантами размещения расплава топлива в ловушке расплава для горячей и холодной кладки реактора ИГР при соответствующих положениях органов регулирования. В расчетах использовались варианты с гомогенным распределением расплава, модель расплава в виде набора стержневых твэлов требуемой массы и в виде таблеток. По результатам расчетов выбран вариант проведения физического пуска с шестью топливными таблетками в графитовом стакане.

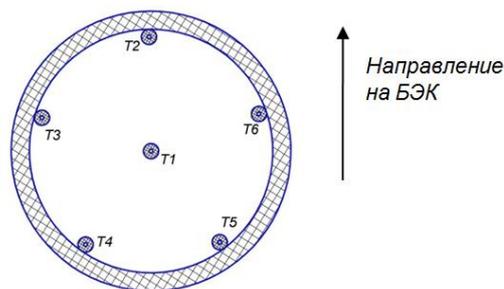


Рисунок 6. Схема установки топливных таблеток в ловушке

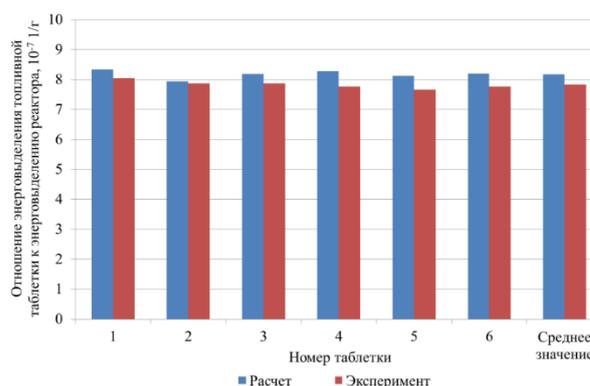


Рисунок 7. Отношение энерговыделения в топливных таблетках ловушки к энерговыделению в реакторе ИГР

Проведен физический пуск ИГР с макетом, содержащем шесть таблеток в ловушке. Проведены спектрометрические измерения активности продуктов деления в таблетках ловушки и твэлах ТВС. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показали их хорошее соответствие.

Полученные данные позволяют определить характеристики режима работы ИГР при проведении испытаний вариантов экспериментального устройства, обеспечивающих имитацию остаточного энерговыделения в расплаве ловушки за счет нейтронного облучения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Программа физических исследований «Эксперимент ID-6» / №11-220-02/656вн от 26.04.2017 г.
2. Эскизный проект экспериментального устройства ID-6: АК.21264.00.000ЭП / Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК.– Курчатов, инв. № К-52184 от 12.02.2015 г.
3. MCNP-5.1.40 Monte-Carlo N-Particle Transport Code; Los Alamos National Laboratory; Los Alamos, New Mexico. – April 24, 2003.
4. Компьютерная модель реактора ИГР для стационарных нейтронно-физических расчетов: а. с. № 2738 от 27.12.16 г. Республика Казахстан / А.Д. Вурим, В.М. Котов, Р.А. Иркимбеков, Л.К. Жагипарова, А.А. Байгожина.
5. Протокол определения соотношения энерговыделения в ТВС, мониторе физического макета экспериментального устройства ID-6 и активной зоне реактора ИГР / 13-240-02 621вн от 30.03.2018 г / Гановичев Д.А.
6. Техническая справка «Энерговыделение в топливе ФМ ЭУ ID-6» / №11-220-01/701вн от 12.04.2018 г / Пахниц А.В.

#### ЭКСПЕРИМЕНТТІК ҚҰРЫЛҒЫНЫҢ НЕЙТРОНДЫҚ-ФИЗИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫН ЕСЕПТІК ЗЕРТТЕУ

Л.К. Жагипарова, В.М. Котов

*ҚР ҰАО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан*

Мақалада нейтрондық сәулелену есебінен тұзақтың балқытпасында қалдық энергия шығарылуын еліктеуге арналған эксперименттік құрылғының (ЭҚ) нейтрондық-физикалық сипаттамаларының есептік зерттеулері ұсынылды [1]. Реакторда энергия шығарылуына тұзақтарды толтырудың түрлі нұсқаларында, қорытпада энергия шығарылуына қатысты есептік анықталар жүргізілді. Физикалық іске қосуды тиімді жүргізу бойынша ұсыныстар өңделді.

#### CALCULATED STUDY OF NEUTRONIC CHARACTERISTICS OF EXPERIMENTAL DEVICES

L.K. Zhagiparova, V.M. Kotov

*Branch “Institute of Atomic Energy” RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

The article presents calculated study of the neutronic characteristics of the experimental device (ED) designed to simulate the residual energy release in the melt trap due to neutron irradiation [1]. The relations of energy release in the melt in different variants of traps filling to the energy release in the reactor are estimated. Proposals for optimal physical start-up have been developed.