Ордена Ленина ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ им. М.В. Келдыша РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Воронков А.В., Ефремов Е.В., Земсков Е.А., Казновский С.П., Кривопустов М.И., Чурбанов А.Г.,

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ТЕРМОМЕТРИИ УРАН-СВИНЦОВОЙ СБОРКИ, ОБЛУЧАЕМОЙ ПУЧКОМ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ПРОТОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 1.5 ГЭВ

АННОТАЦИЯ

В данной работе проведен расчетный анализ экспериментов по термометрии уран-свинцовой сборки, эксперименты были проведены на пучке протонов с энергией 1.5 Гэв синхрофазотрона Объединенного института ядерных исследований.

Экспериментальная установка включала в себя кроме собственно свинцовой мишени, окружающий мишень бланкет из стержней урана (две секции по 30 стержней длиной 10.4 см, радиусом 3.6 см и общей массой ~ 103.2 кг.). Было проведено три эксперимента, второй и третий с укороченной свинцовой частью. Подробные термометрические измерения были проведены с использованием высокочувствительных микротермопар Всероссийского научно-исследовательского института атомного машиностроения.

Все эксперименты были подробно проанализированы расчетным путем в Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. В данной работе представлены результаты расчета температурных полей и их сравнение с данными термометрии для уран-свинцовой сборки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных исследований (№ Проекта 00-01-00290)

Voronkov A.V., Efremov E.V., Zemskov E.A., Kaznovskiy S.P., Krivopustov M.I., Churbanov A.G.

CALCULATIVE ANALYSIS FOR EXPERIMENTS OF THERMOMEASURING THE URAN-LEADEN TARGET, IRRADIATED BY A BEAM OF RELATIVISTIC PROTONS WITH THE ENERGY 1.5 GEV.

ABSTRACT

This work provides the calculative analysis for the experiments of thermomeasuring the uran-leaden target, the experiments were carried out with the beam of 1.5Gev-protons in the Joint Institute of Nuclear Research.

The experimental unit included the leaden target, the blanket of uranium bars (2 sections with 30 bars 10.4 cm long, with radius 3.6 cm and weight ~103.2 kg). Detailed experiments with measuring the temperature were carried out in the All-Russia Science-Technical Institute of Atomic Engineering.

These experiments were analyzed in a computational way in the Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS. This work provides the results of calculation of temperature fields and their comparison with the data of thermomeasuring.

This work was supported by the Russian Foundation for Fundamental Investigations (Project # 00-01-00290)

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Введение	4
1.	Описание экспериментов по термометрии и теплофизические измерения уран-свинцовой сборке (сборка 2)	5
2.	Расчеты нестационарных пространственных температурных полей в мишенных сборках	16
	2.1 Расчеты тепловых полей по программе ТЕМР	16
	2.2 Расчет температурных полей в мишени по комплексу PARSE-2	24
	Заключение	29
	Литература	31
	Приложение	33

Введение

Данная работа является продолжением серии работ [1,2] по анализу экспериментов по термометрии мишеней, облучаемых пучком протонов исследования выполняются различной энергии. Эти Объединенным институтом ядерных исследований (ОИЯИ, г. Дубна), Институтом прикладной математики им. Келдыша РАН (ИПМ, г. Москва) и Всероссийским научнопроектно-констроукторским институтом исследовательским и энергетического машиностроения (ВНИИАМ, г. Москва) под руководством В.И. проблемы Балдина И Субботина рамках академиков A.M. электроядерной энергетики и трансмутации радиоактивных отходов.

В предыдущем препринте[1] представлены результаты расчета температурных полей в массивной свинцовой мишени. Эксперимент по ее облучению протонами с энергией 5 Гэв был проведен в 1998 году [3].

В 1999 году эксперименты по исследованию пространственновременных распределений температур в мишенях, облучаемых высокоэнергетическими протонами, были продолжены уже на более сложном мишенном комплексе, являющимся прототипом полномасштабной урансвинцовой сборки, разрабатываемой в ОИЯИ в рамках проекта "Энергия плюс трансмутация" [4].

Экспериментальная установка (сборка 2) включала в себя кроме собственно свинцовой мишени (секционный цилиндр диаметром 8.4 см. и длиной \sim 50 см.), окружающий мишень бланкет из стержней урана (две секции по 30 стержней длиной 10.4 см, радиусом 3.6 см и общей массой \sim 103.2 кг.). Было проведено три эксперимента, второй и третий с укороченной на 5 см. свинцовой частью. Энергия протонов в пучке составляла 1.5 Гэв, различными были токи в пучке.

Очевидно, что эти эксперименты носят более сложный характер, так как на процессы взаимодействия протонов с веществом мишени накладываются процессы, происходящие в урановом бланкете под действием протонов и нейтронов, вылетающих из свинцой мишени.

В этих экспериментах также были проведены подробные термометрические измерения с использованием высокочувствительных микротермопар ВНИИАМ.

Все эксперименты были подробно проанализированы расчетным путем в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. В данной работе представлены результаты расчета температурных полей и их сравнение с данными термометрии для сборки мишень+бланкет.

1. Описание экспериментов по термометрии и теплофизические измерения уран-свинцовой сборке (сборка 2)

Для экспериментального исследования пространственно-временных распределений температур в свинцовой мишени и урановом бланкете использовались разработанные ВНИИАМ методика и средства термометрии. Они включают в себя высокочувствительные малоинерционные микротермопары и регистрирующую аппаратуру на основе мини-ЭВМ и специальной микро-платы. Эти средства обеспечивают точность измерения температуры $0.02\text{-}0.03^{\circ}\text{C}$.

Общий вид уран- свинцовой сборки (сборка 2), на которой проводился эксперимент по разогреву мишени и бланкета за счет энерговыделения, обусловленного процессами, происходящими под воздействием пучка протонов, представлен на рис.1.1, схема размещения микротермопар на рис. 1.2

Секционная свинцовая мишень имеет диаметр 8.4 см, она разделена на две части текстолитовой пластиной толщиной 0.5 см, общая длина свинцовой части 50 см., масса ≈ 31 кг.

Бланкет, тесно прижатый к мишени, имеет две секции, содержащих по два слоя урановых стержней. Каждый стержень из естественного урана, упакованный в герметичную алюминиевую оболочку толщиной 0.05 см, имеет следующие внешние размеры: диаметр 3.6см., длина 10.4 см, масса стержня равна 1720 г. В состав каждой секции входит 30 урановых стержней, имеющих общую массу 51.6 кг. Металлический каркас, в котором монтируются урановые стержни, после сборки позволяет жестко фиксировать положение каждого стержня в шестигранной упаковке.

Мишень облучалась пучком протонов с энергией 1.5 Гэв, получаемых на синхрофазотроне, работающем в циклическом режиме. Импульс пучка имеет длительность около 0.3 сек, время между импульсами 9 сек. Таким образом, цикл работы ускорителя составляет 9.3 сек. За один такой цикл на мишень попадает около 10^{11} протонов.

На этой установке было проведено три эксперимента по облучению мишени. Первые два облучения длительностью около 43 мин. каждое, третье - длительностью около 2-х часов. Второе и третье облучение проводилось, когда из мишени был удален первый по ходу протонного пучка свинцовый диск, имеющий толщину 5 см. В первом эксперименте за время облучения в мишень попало ~2.37E+13 протона, средняя мощность пучка равна ~2.18 вт. Во втором —число протонов равно ~2.29E+13, средняя мощность пучка ~2.09 вт, в третьем — 4.00E+13 протона, средняя мощность ~1.25 вт.

С учетом методических результатов, полученных ранее в исследованиях на большом свинцовом блоке с размерами 50х50х80 см [1], термопары в секционированной мишени были установлены в трех сечениях на расстояниях, равных 51, 106 и 214 мм от переднего торца мишени вдоль оси Z (ось пучка

протонов). Их номера (21,22), (3,4,5) и (10,11,12). Термопары размещались на расстоянии 1 мм (по оси Z) от торцевых поверхностей свинцовых дисков в трех точках по радиусу: R=0, 15 и 30 мм. Заделка термопар осуществлялась вводом их в радиальные высверленные каналы с последующей зачеканкой спаев через торцевые поверхности дисков.

Для изучения динамики тепловыделения в бланкете микротермопары с номерами (6÷9), (13÷16) и (17÷20) устанавливались по центру торцов урановых стержней (по четыре стержня в каждой секции бланкета) в трех сечениях по оси Z (на расстояниях 108, 212 и 327 мм от переднего по ходу пучка торца мишени). Эти микротермопары были прижаты к торцевым поверхностям урановых стержней с помощью специальных винтовых устройств. Стержни были выбраны так, чтобы их координаты по радиусу были различны. При шестигранной упаковке возникает четыре характерных положения стержней с радиусами 62.35, 72., 95.25 и 108 мм.

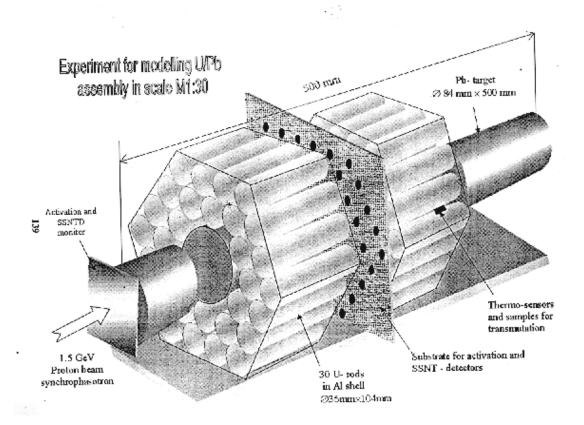


Рис. 1.1 Общий вид уран-свинцовой мишени (сборка 2)

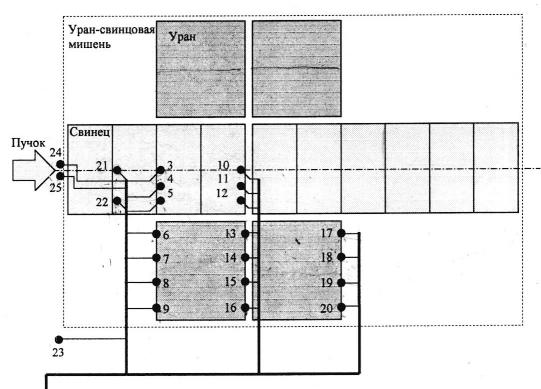


Рис 1.2. Схема размещения микротермопар в эксперименте с уран-свинцовой мишенью (сборка 2)

С учетом результатов работы [1] предполагалось, что в сечении, где установлены термопары с номерами $(3\div 9)$, интенсивность взаимодействия протонного пучка с ядрами свинца (а, следовательно, генерация вторичных нейтронов) будет максимальной.

Наличие интенсивных потоков протонов в мишени и потоков вторичных нейтронов бланкете предъявляет дополнительные требования достоверности измерений температуры с помощью термопар. С целью проверки возможности и масштабов искажений показаний микротермопар за счет прямого воздействия протонов были установлены дополнительные термопары с номерами 24 и 25 на пути протонного пучка перед мишенью (на расстоянии 4 мм от ее переднего торца). Они предназначались для контроля фонового влияния прямого попадания протонов на спаи термопара. Термопара номер 23, установленная вне сборки, позволяла контролировать температуру в экспериментальном зале в течение облучения. Компенсационная коробка с термосопротивлением (канал номер 1) размещалась на расстоянии 1.5 метра ниже оси симметрии симметрии уран-свинцовой сборки.

Результаты термометрии представлены на рис 1.3-1.8, 1.9-1.14. Для иллюстрации дана часть термограмм, полученных в ходе второго и третьего эксперимента, но в представленном ниже анализе качественного поведения температур использованы данные из всех трех экспериментов. Во время облучений наблюдалась устойчивая тенденция снижения температуры окружающей среды. Этот фактор был учтен, и приведенные на графиках термограммы для второго эксперимента получены в результате пересчетов первичных измерений с учетом влияния этого внешнего обстоятельства. На них показаны величины изменения температур (нагрев, ΔT^{O} C).. Термограммы для третьего эксперимента даны без такой обработки.

Качественно результаты измерений заключаются в следующем. В свинцовой мишени максимальный нагрев происходит на глубине примерно 50 мм от входного торца свинцовой мишени и составляет около $0.5\,^{\circ}$ С за 43 минуты облучения. С увеличением значения координаты Z нагрев мишени снижается и составляет около $0.2\,^{\circ}$ С при Z=200 мм. Изменения температуры по радиусу мишени относительно небольшие. Нагрев в урановом бланкете составляет $0.15\text{-}0.35\,^{\circ}$ С, слабо изменяется по длине стержня и снижается с увеличением радиуса.

Изменения температуры в точках 24 и 25 во время облучения практически отсутствуют. Таким образом, прямое воздействие протонов на термопары при интенсивности пучка до 10^{10} протонов в секунду не приводит к искажениям их показаний (по крайней мере, в пределах точности измерений ± 0.03 °C).

Предварительные оценки по результатам экспериментов показали, что при тепловой мощности протонного пучка около 2 вт тепловыделение в свинцовой мишени составило примерно 0.5 вт, а тепловыделение в урановом бланкете — около 1 вт. При этом можно предположить, что входной и, в

меньшей мере, выходной участки мишени, не окруженные секциями уранового бланкета, теряют часть вторичных нейтронов в "атмосферу", т.е. эти нейтроны не попадают в урановые стержни бланкета и тем самым не производят деления ядер урана.

С учетом этого целесообразно провести дополнительные эксперименты на уран- свинцовой модели, доукомплектовав ее еще одной секцией урановых стержней на входном участке и, возможно, такой же секцией на выходном участке мишени.

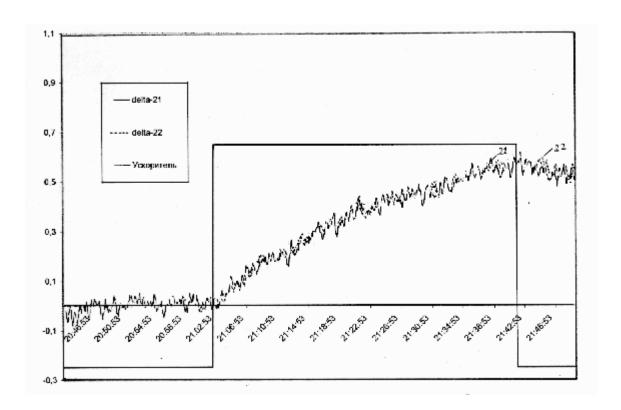


Рис 1.3. Эксперимент 2. Показания термопар 21,22

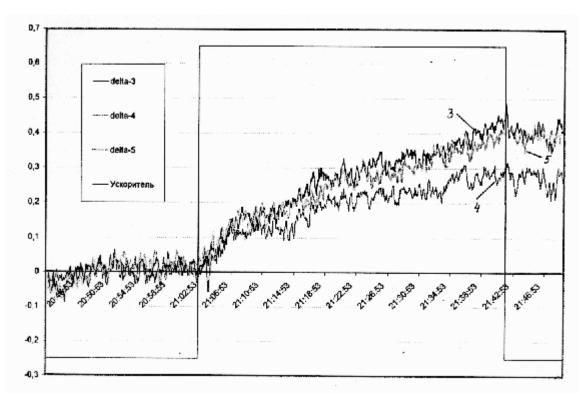


Рис 1.4. Эксперимент 2. Показания термопар 3,4,5

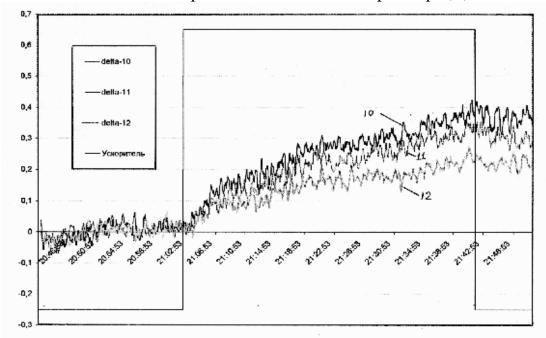


Рис 1.5. Эксперимент 2. Показания термопар 10, 11,12

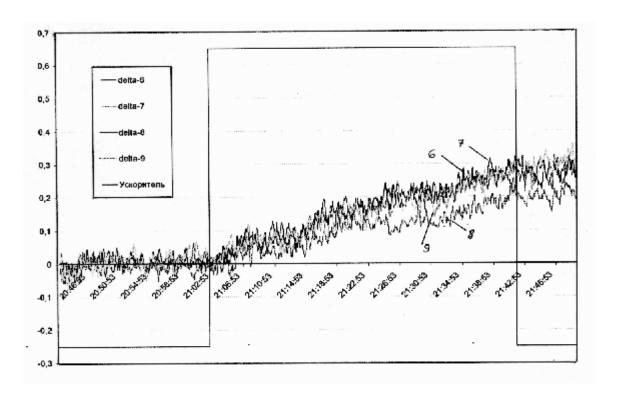


Рис 1.6. Эксперимент 2. Показания термопар 6, 7, 8, 9

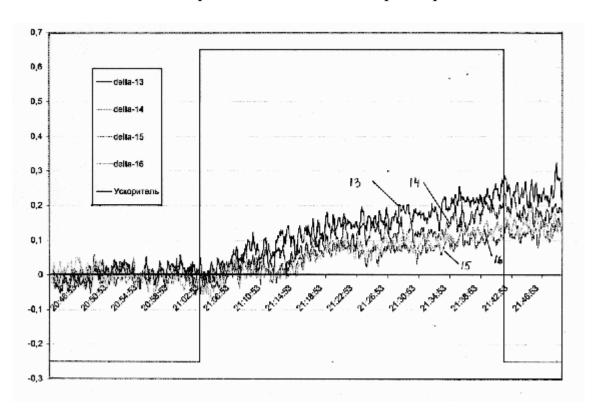


Рис 1.7. Эксперимент 2. Показания термопар 13, 14, 15, 16

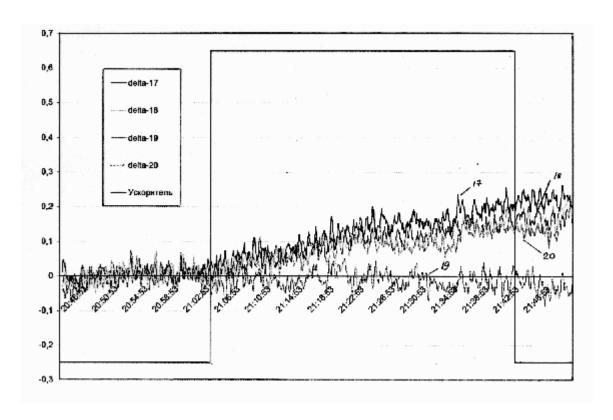


Рис 1.8. Эксперимент 2. Показания термопар 17, 18, 19, 20

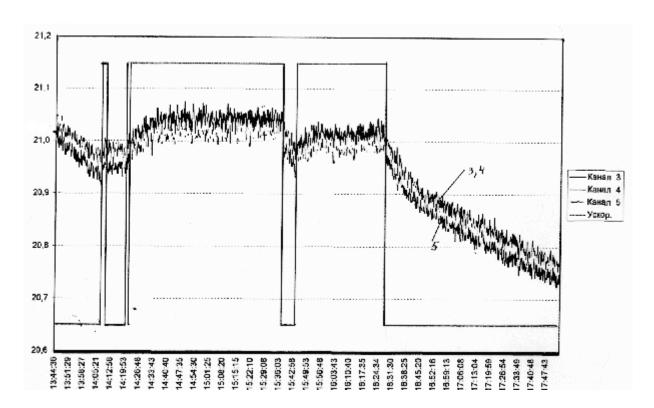


Рис. 1.9. Эксперимент 3. Показания термопар 3,4,5

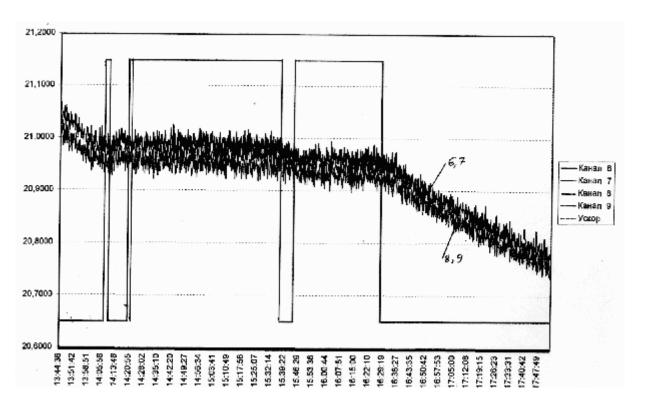


Рис. 1.10. Эксперимент 3. Показания термопар 6,7,8,9

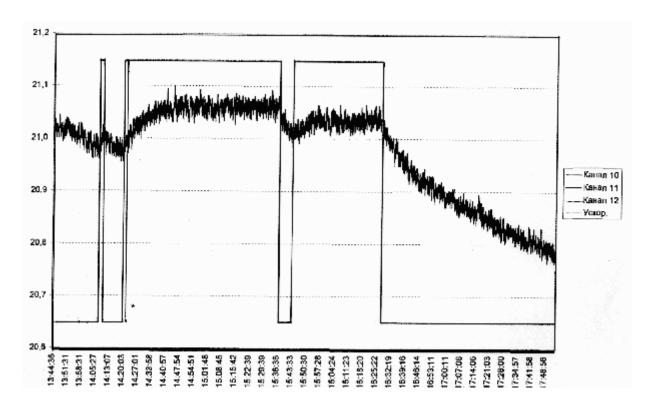


Рис.1.11. Эксперимент 3. Показания термопар 10,11,12

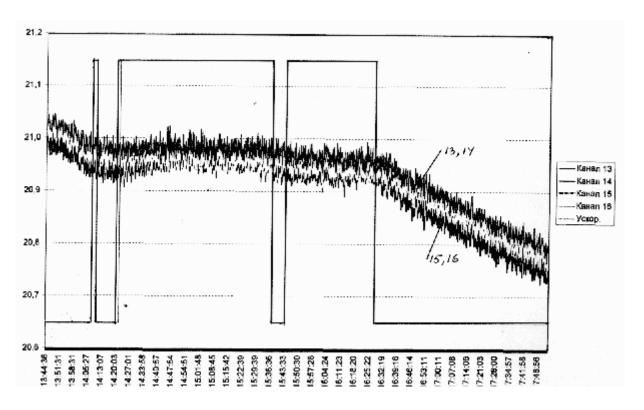


Рис. 1.12 Эксперимент 3. Показания термопар 13,14,15,16

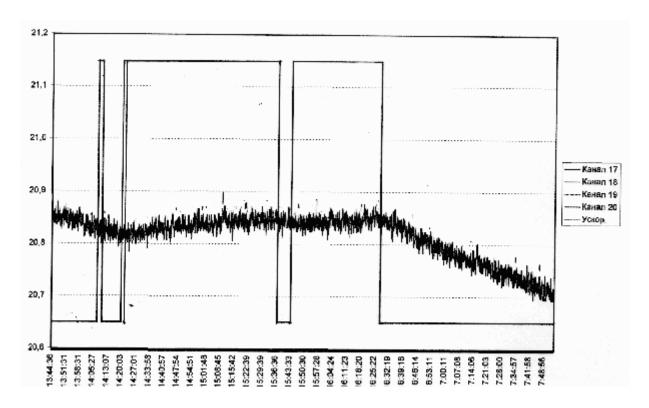


Рис. 1.13. Эксперимент 3. Показания термопар 17,18,19,20

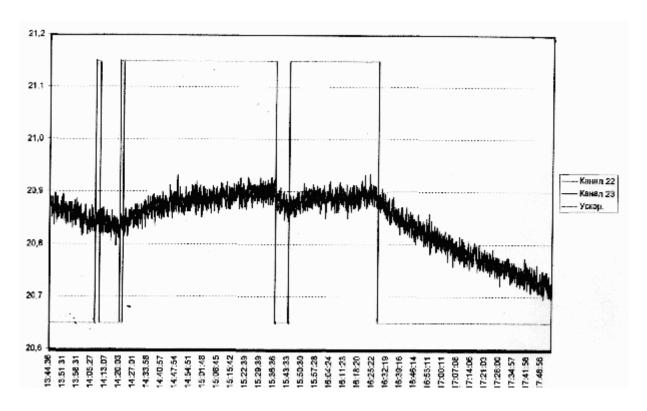


Рис. 1.14. Эксперимент 3. Показания термопар 22,23

2. Расчеты нестационарных пространственных температурных полей в мишенных сборках

Расчеты температурных полей были выполнены по двум программам: по конечно-разностной программе ТЕМР [5] и по программе метода Монте-Карло PARSE-2 [6]. Первая программа решает нестационарную тепловую задачу в цилиндрической геометрии. Поэтому в расчете по ней пришлось использовать несколько моделей расчета по тепловому контакту мишени и бланкета, что позволило выбрать вариант, наиболее точно отражающий физику процесса. Второй программный комплекс служит удачным примером альтернативного детерминистическим методом расчета, который может быть в дальнейшем применен для расчета тепловых процессов в сложных по геометрии системах.

Для нестационарных тепловых расчетов необходимо знать внешний источник энерговыделения, нарабатываемый в объеме облучаемой установки под действием пучка протонов.

Расчет внешнего энерговыделения представляет источника самостоятельную важную задачу, которая детально была решена для рассматриваемой мишени ранее с привлечением как отечественных расчетных программных комплексов SHIELD[7] и PARSE-2 [6], так и известного кода Лос-Аламосской лаборатории США LAHET [8]. Результаты расчетов по этим программам и их сравнение подробно описаны в предыдущей нашей работе приложении значений приведены таблицы энерговыделения, программному которые насчитанные комплексу LAHET. были использованы в расчетах полей нестационарных температур.

2.1 Расчеты тепловых полей по программе ТЕМР

Целью вычислительных экспериментов являлся расчет по заданному тепловому источнику нестационарных полей температуры в объеме свинцовой мишени и окружающем ее бланкете при их облучении пучком протонов и сравнение полученных результатов с данными термометрии.

Нестационарный процесс распространения тепла в неоднородном теле, включающем в себя области с различными свойствами, описывается следующим уравнением теплопроводности, записанном в цилиндрических координатах в предположении осевой симметрии задачи:

$$\frac{\partial (C_p \rho T)}{\partial t} = \left[1/r \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + Q_T,$$

где t- время, (r,z)- цилиндрические координаты , T- температура, ρ - плотность, λ - коэффициент теплопроводности, C_p - теплоемкость при постоянном давлении, Q_T – мощность теплового источника.

Для решения приведенного выше уравнения теплопроводности с разрывными коэффициентами использовался эффективный численный

алгоритм сквозного счета [9-12], позволяющий решать сопряженную задачу во всей рассматриваемой области, состоящей из компонент с различными свойствами.

Данный алгоритм имеет следующие особенности:

- он основан на конечно-разностных аппроксимациях;
- используется полностью неявная схема, имеющая второй порядок аппроксимации по пространству и первый по времени;
- для решения получаемых на каждом временном слое систем алгебраических уравнений используются современные эффективные итерационные методы сопряженных градиентов с предобуславливанием: ICCG для симметричных и ORTHOMIN(1) для несимметричных матриц.

По программе ТЕМР были рассчитаны температурные поля для всех представленных выше экспериментов.

Исследуемая область представляет собой цилиндрическую свинцовую мишень радиуса 4,2 см и длиной 50,3 см, окруженную цилиндризованным бланкетом с внешним радиусом 11,458 и длиной 21,1 см, начинающимся на расстоянии 9,6 см от облучаемого торца мишени. Бланкет в такой цилиндрической постановке представляет собой однородное твердое тело со свойствами, получаемыми осреднением составляющих бланкет урановых цилиндров с алюминиевой оболочкой и воздушных прослоек между ними. На расстоянии 20,0 см от торца рассматриваемая конструкция разделена на две части в радиальном сечении слоем текстолита толщиной 0,3 см.

В расчетной модели считалось, что мишень и бланкет не имеют теплового контакта, т.е. являются изолированными друг от друга тонким слоем воздуха. Теплоотвод в воздух с поверхности мишени и бланкета учитывался со значением коэффициента теплоотдачи $\alpha = 5.6 \, \mathrm{Bt/(M2~K)}$.

Расчеты проводились на подробной равномерной сетка 114 x 252 узлов с шагами, приблизительно равными 0,1 см в радиальном направлении и 0,2 см в осевом. Рассчитывалось отклонение от начальной температуры, равной T=24 С. Заданное нестационарное тепловыделение мощностью 1.5 ГэВ приводило к постепенному прогреванию свинцовой мишени. Тепловые свойства свинцовой мишени, бланкета и текстолита имели следующие значения:

```
свинец: \rho = 11\ 330\ \text{кг/м3}, C_p = 130\ \text{Дж/(кг K)}, \lambda = 35\ \text{Bt/(м K)}; бланкет: \rho = 15\ 000\ \text{кг/м3}, C_p = 131\ \text{Дж/(кг K)}, \lambda = 34,25\ \text{Bt/(м K)}; текстолит: \rho = 1\ 300\ \text{кг/м3}, C_p = 1,5\ \text{Дж/(кг K)}, \lambda = 0,2\ \text{Bt/(м K)}.
```

Следует еще раз подчеркнуть, что в используемой осесимметричной постановке задачи бланкет представляет собой осредненное однородное тело со свойствами, получаемыми осреднением теплофизических свойств составляющих его в определенной пропорции компонент (80% - уран, 0,05% - алюминий и 15% - воздух).

Результаты расчета первого эксперимента по термометрии урансвинцовой сборки показаны на рис. 2.1-2.10.

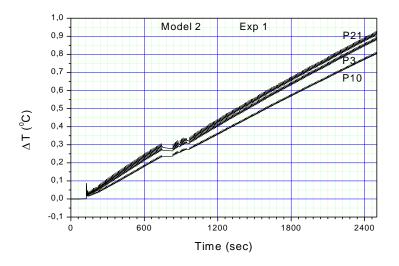


Рис. 2.1 Точки 21, 3, 10, эксперимент 1

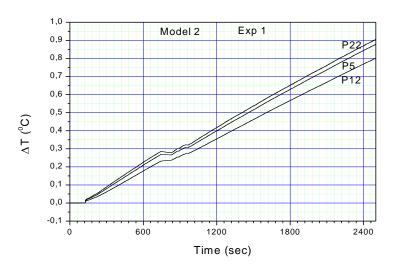


Рис. 2.2 Точки 22, 5, 12, эксперимент 1

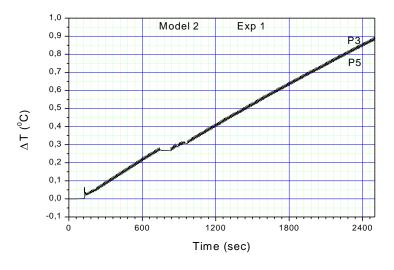


Рис. 2.3 Точки 3, 5, эксперимент 1

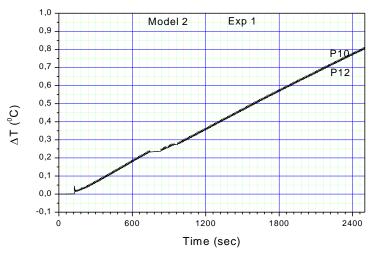


Рис. 2.4 Точки 10, 12, эксперимент 1

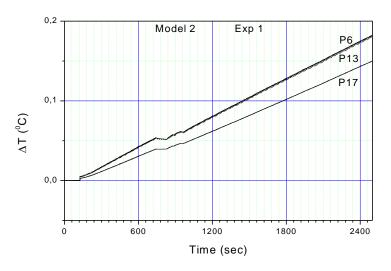


Рис. 2.5 Точки 6, 13, 17, эксперимент 1

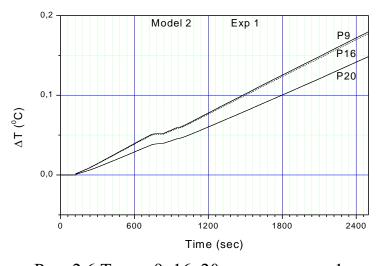


Рис. 2.6 Точки 9, 16, 20, эксперимент 1



Рис. 2.7 Точки 6, 9, эксперимент 1

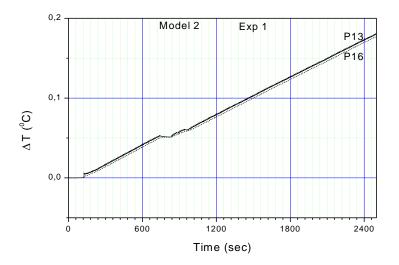


Рис. 2.8 Точки 13, 16, эксперимент 1

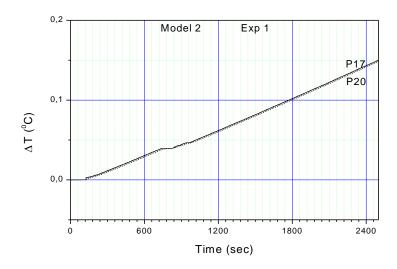


Рис. 2.9 Точки 17, 20, эксперимент 1

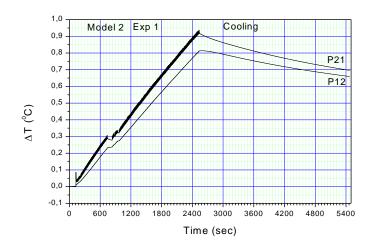


Рис. 2.10 Точки 21, 12 с остыванием, эксперимент 1

Результаты расчета второго эксперимента на сборке 2 представлены на рис 2.11-2.14. Их нужно сравнивать с экспериментальными результатами, отраженными на приведенных выше рисунках 1.3-1.8.



Рис.2.11 Точки 21, 3, 10, эксперимент 2

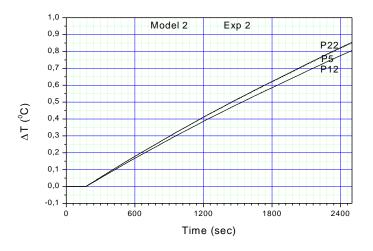


Рис.2.12 Точки 22, 5, 12, эксперимент 2

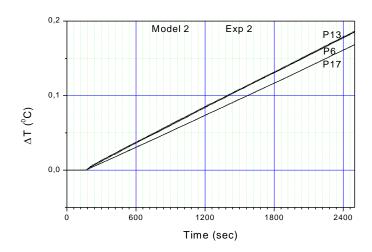


Рис.2.13 Точки 13, 6, 17, эксперимент 2

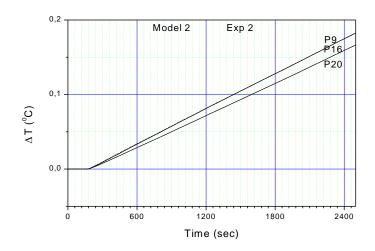


Рис.2.14 Точки 9, 16, 20, эксперимент 2

Расчет второго эксперимента дает результаты примерно в 1,7 раз завышенные в мишени, и достаточно близкие к измерениям в бланкете.

Расчет третьего эксперимента потребовал более тщательно проанализировать начальные условия по температурам. Из графиков по термометрии (рис. 1.9-1.14) видно, что начальные температуры отдельных блоков установки имеют различные значения. Температура окружающего воздуха ниже, чем сборки, поэтому пока не включен пучок, сборка остывает.

Тепловой расчет третьего эксперимента на сборке 2 был проведен в двух вариантах. В первом варианте коэффициент теплоотдачи $\alpha=3,4$ Вт/(м2 K) с поверхности мишени считался постоянным во время эксперимента. В этом случае расчетные значения температуры в мишени получались завышенными по сравнению с показаниями термопар, выход на температурную "полочку", которая хорошо прослеживается по данным термометрии, не происходил. Во втором варианте была принята гипотеза, что при включении пучка протонов воздух ионизируется и теплоотвод в воздух увеличивается, коэффициент теплоотдачи был принят равным $\alpha=12,0$ Вт/(м2 K). Графики температур в отдельных точках мишени для этого случая приведены на рисунках 2.15. Видно, что второй вариант хорошо согласуется с экпериментальными показаниями соответствующих термопар. Расчет температуры в отдельном урановом стержне с постоянным коэффициентом теплоотдачи представлен на рис. 2.16

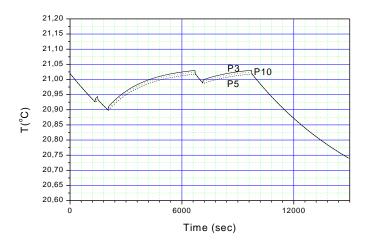


Рис 2.15 Мишень, точки 3, 5, 10, эксперимент 3

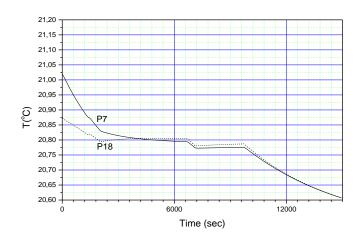


Рис 2.16 Бланкет, урановый блок 1, точки 7, 18, эксперимент 3

2.2 Расчет температурных полей в мишени по комплексу PARSE-2

Для решения уравнения теплопроводности в сложных геометриях используется метод, основанный на приближении теории переноса [13]. В работе [14] показано, что стандартное нестационарное односкоростное уравнение переноса в трёхмерной постановке эквивалентно уравнению теплопроводности

$$-\rho c \frac{\partial T(\bar{r},t)}{\partial t} + \nabla K \nabla T(\bar{r},t) + Q(\bar{r},t) = 0$$

с граничным и начальным условиями

$$K(n\nabla T(\bar{r},t))_{\Gamma} = H(T_{\Gamma}(\bar{r}_{\Gamma},t) - T_{0}(\bar{r}_{\Gamma},t));$$

$$T(r,0) = 0;$$
(1)

где r - радиус-вектор; t - время;

Q - объёмная плотность источника;

 $\rho = \rho(r)$ - плотность конструкционных материалов;

c = c(r) - удельная теплоёмкость;

K = K(r), H - коэффициенты теплопроводности и теплоотдачи;

T - температура;

 $T_{\scriptscriptstyle 0}(ar r_{\scriptscriptstyle \Gamma},t)$ - температура окружающей среды.

При этом считается, что сечение поглощения в уравнении переноса равно нулю, а источник и сечение рассеяния изотропны. Кроме того, масштаб полного сечения взаимодействия изменён так, что решение уравнения переноса (плотность потока) имеет анизотропию в незначительной части области по сравнению с её размерами.

Изменение масштаба полного сечения компенсируется зависимостью

$$T(\bar{r},t) = \frac{\Phi(\bar{r},t)}{\gamma}$$

где $\Phi(\bar{r},t)$ - нулевая гармоника в разложении плотности потока в ряд по полиномам Лежандра.

Как показано в [14] при этих условиях

$$\Sigma(r) = \Sigma_s(\bar{r}) = \frac{\gamma}{3K(\bar{r})}$$

$$v(r) = \frac{\gamma}{c(r)\rho(r)}$$

где v(r) - скорость частиц в уравнении переноса.

Граничное условие (1) при $T_0(\bar{r}_r,t)=0$ в уравнении переноса может быть представлено в виде условия на альбедо

$$\beta = \frac{\gamma - 2H}{\gamma + 2H}.$$

Данный алгоритм реализован в комплексе программ PARSE2.

С использованием адаптированного комплекса программ PARSE2 проведены расчёты пространственно-временного распределения температуры в свинцовой мишени сборки с бланкетом (сборка 2, эксперимент 1,3).

На рис.2.17-2.19 приведены графики возрастания температуры ΔT , °C в первом эксперименте в зависимости от времени t, прошедшего после начала облучения. Из них видно, что согласно результатам расчётов резкое увеличение температуры происходит после 127 секунды облучения, когда на свинцовую мишень падает наиболее интенсивный импульс протонов $(3,76\cdot10^{11}$ прот. в импульсе), после чего температура возрастает более медленно и достигает в середине свинцового цилиндра на 743 с ~0,53°C; 0,4°C и 0,24°C для расстояний по оси Z, где расположены термопары 21, 3 и 10, соответственно. В эксперименте аналогичные температуры составляют ~0,35°C; 0,15°C и 0,1°C. Далее, в связи с резким (на несколько порядков)

снижением интенсивности пучка наблюдается спад расчётных температур до 0,45°C; 0,35°C и 0,2°C в областях размещения термопар 21, 3 и 10, соответственно. В дальнейшем идёт облучение интенсивным пучком протонов и температура постепенно возрастает. В конце облучения она составляет 0,9°C; 0,71°C и 0,52°C в областях размещения термопар 21, 3 и 10, соответственно. Последние два значения температур выше экспериментальных более чем в 2 раза.

Аналогичная зависимость и соотношения в основном характеризуют изменение температур и в области размещения других термопар в свинцовой мишени за исключением лишь термопар, размещённых ближе к боковой поверхности свинцовой мишени. Здесь, согласно расчётным данным, практически не наблюдается влияние на температуру резкого снижения интенсивности пучка после 743 секунды.

Статистическая погрешность рассчитанных результатов составляет не более нескольких процентов.

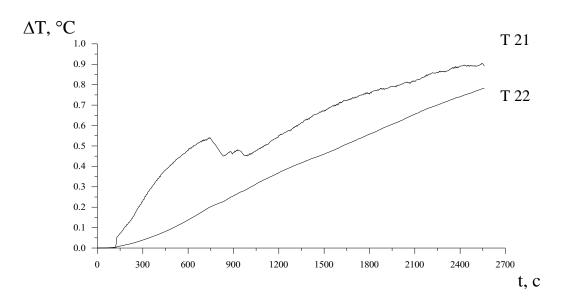


Рис 2.17 Прирост температуры в точках расположения 21,22 термопар

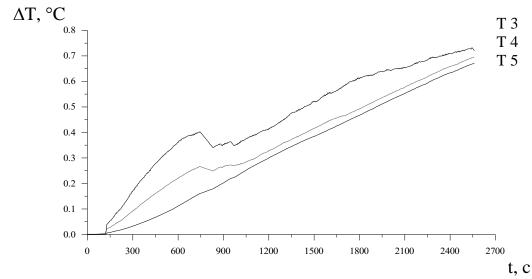


Рис 2.18. Прирост температуры в точках расположения 3,4,5 термопар

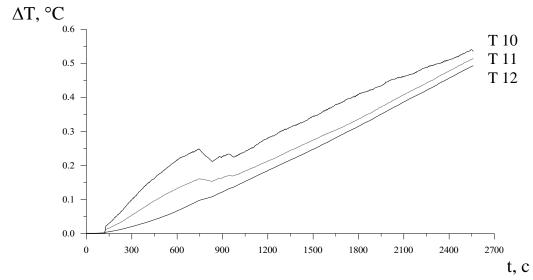


Рис 2.19 Прирост температуры в точках расположения 10,11,12 термопар

Результаты расчета третьего эксперимента, выполненного по программе PARSE-2 с учетом реальной геометрии и мишени и бланкета, представлены на рис.2.20-2.22.

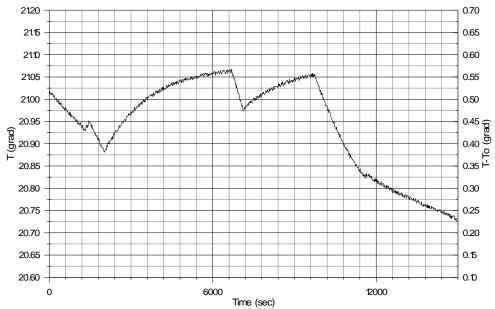


Рис 2.20 Расчетная температура в месте расположения термопары 3 (свинец).

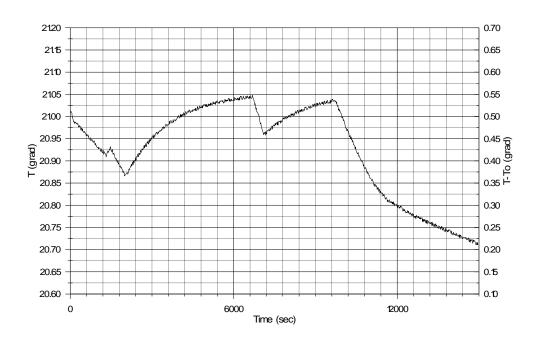


Рис. 2.21 Расчетная температура в месте расположения термопары 10 (свинец)

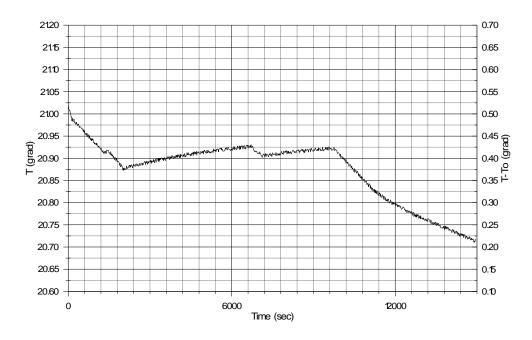


Рис. 2.22 Расчетная температура в месте расположения термопары 6 (урановый стержень)

Эти результаты дают довольно близкую к эксперименту картину, хотя и не отражают равновесного поведения выделяемой и отводимой энергии, так как отсутствует выход на постоянную температуру.

Заключение

В работе проведен расчетный анализ экспериментов по термометрии уран-свинцовой сборки, проведенных в 1999-2000 годах в ОИЯИ (г. Дубна). Сборка состоит из собственно свинцовой мишени (цилиндр диаметром 8.4 см. и длиной 50 см) и окружающего ее бланкета из стержней урана. Сборка облучалась пучком протонов с энергией 1.5 Мэв. от синхрофазотрона Лаборатории высоких энергий, мощность пучка составляла 1-2 вт. Такой мощности достаточно на разогрев мишеней только на несколько десятых градуса, максимальные изменения в показаниях термопар не превышают 0.5 0 С

Проведенные расчеты нестационарных температурных полей качественно согласуются с показаниями термопар в различных экспериментах. Детальное согласие с экспериментом при таких малых изменениях температур требует более точного знания теплотехнических характеристик мишеней.

Расчеты, проведенные на модели уран-свинцовой сборки, показывают, что при включении пучка протонов коэффициент теплоотдачи от поверхности мишени в воздух должен возрастать. Одной из возможных причин этого в этих экспериментах, по-видимому, являются эффекты ионизации окружающего мишень воздуха, так как эта мишень не является для протонов мишенью полного поглощения. Результаты расчета детально согласуются с

экспериментальными данными, если коэффициент теплоотдачи на время включения пучка увеличить в три раза.

Подводя итоги по расчетному анализу экспериментов по термометрии, следует отметить, что сами эксперименты должны быть организованы и задокументированы более строго. Совершенно необходимо устанавливать теплоизоляцию для различных конструкционных частей сборок, более тщательно контролировать начальные температуры в мишени и температуру окружающего воздуха. Необходимо обеспечить при проведении экспериментов такие временные условия, чтобы можно было добиться температурной стабилизации в начале эксперимента и достаточной выдержки после эксперимента.

Литература

- 1. Воронков А.В., Земсков Е.А., Казновский С.П., Кривопустов М.И., Чурбанов А.Г., Расчетный анализ эксперимента по термометрии массивной мишени из свинца, облучаемой пучком протонов. Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2000 (в печати)
- 2. Воронков А.В., Земсков Е.А., Казновский С.П Кривопустов H.M., Чурбанов Соболевский A.Γ., Расчетный анализ полей мишенях, облучаемых энерговыделения В пучком релятивистских протонов. Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2000 (в печати)
- 3. Р. Брант, С.П. Казновский, М.И. Кривопустов и др. Исследование температурного и нейтронного полей в свинцовой среде при взаимодействии с релятивистскими протонами. Препринт ОИЯИ Р1-99-117, Дубна, 1998
- 4. Кривопустов М.И., Чултэм Д., Адам И. И др. О первом эксперименте по калориметрии уранового бланкета на модели U/Pb-сборки электроядерной установки "Энергия плюс трансмутация" на пучке синхрофазотрона ОИЯИ при энергии протонов 1.5 Гэв. Препринт ОИЯИ, P1-2000-168, Дубна
- 5. А.Н. Павлов, А.А. Ионкин, А.В. Воронков, А.Г. Чурбанов. "Однородный метод моделирования тепломассопереноса в областях со сложной внутренней структурой". Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН №8, 1998.
- 6. Е.В. Ефремов, Н.А. Иванов, О.Б. Москалев. "PARSE-2 комплекс программ для расчетов методом Монте-Карло адронного каскада в трехмерной геометрии". Тезисы докладов VI Всероссийской научной конференции по защите от ИИ ЯТУ, Обнинск, 1998.
- 7. A.V.Dementyev, N.M.Sobolevsky. SHIELD Universal Monte Carlo Hadron Transport Code: Scope and Applications. Radiation Measurements, **30** (1999) 553.
- 8. R.E. Prael and H. Lichtenstein, "User Guide to LCS: The LAHET Code System", LANL report LA-UR-89-3014 (September 1989).
- 9. A.G.Churbanov, A.N.Pavlov and P.N.Vabishchevich. Operator-splitting methods for the incompressible Navier-Stokes equations on non-staggered grids. Part 1: First-order schemes. //Int. J. Numer. Methods Fluids, 1995, v.21, No.8, pp.617-640.
- 10.П.Н.Вабищевич, А.Н.Павлов, А.Г.Чурбанов. Методы расчета нестационарных несжимаемых течений в естественных переменных на неразнесенных сетках. //Матем. моделирование, 1996, т.8, N 7, с.81-108.
- 11.П.Н.Вабищевич, А.Н.Павлов, А.Г.Чурбанов. Численные методы решения нестационарных уравнений Навье-Стокса в естественных переменных на частично разнесенных сетках. //Матем. моделирование, 1997, т.9, N 4, с.85-114.

- 12.A.G.Churbanov and A.Ya.Gorbatchevski. Mathematical modeling of conjugate heat and mass transfer in a chemical reactor with incrustations. In: Proc. 2nd Int. Conf. On Finite-Difference Methods: Theory and Applications (CFDM98) (Ed. A.A.Samarskii), pp.80-84. Minsk, Belarus, 1998.
- 13. Фрейли С.К., Хофман Т.Д., Стивенс П.Н. Решение задач теплопроводности методом Монте-Карло. Теплопередача, 1980, т.102, ?1, с.133.
- 14. Прецизионные методы статистического моделирования в прикладных задачах переноса излучений. Докт. дисс. Андросенко П.А. ГНЦ ФЭИ, Обнинск, 1994.

Приложение

Таблица 1 Энерговыделение в ячейках модели мишень-бланкет в реальной геометрии (мэв/см**3 протон), эксперимент 1

1	.22425E+01	21	.70871E+00	41	.71098E-01
2	.22625E+01	22	.74407E+00	42	.88973E-01
3	.20613E+01	23	.73256E+00	43	.97376E-01
4	.18784E+01	24	.67962E+00	44	.10148E+00
5	.17167E+01	25	.62004E+00	45	.98752E-01
6	.15351E+01	26	.56825E+00	46	.99036E-01
7	.13257E+01	27	.50994E+00	47	.96347E-01
8	.11591E+01	28	.45374E+00	48	.91172E-01
9	.10098E+01	29	.41351E+00	49	.88533E-01
10	.83082E+00	30	.37027E+00	50	.82948E-01
11	.42162E+00	31	.25204E+00	51	.12144E+00
12	.72500E+00	32	.32670E+00	52	.79959E-01
13	.61286E+00	33	.29478E+00	53	.73099E-01
14	.52011E+00	34	.25232E+00	54	.70124E-01
15	.43862E+00	35	.22680E+00	55	.65070E-01
16	.35964E+00	36	.19513E+00	56	.61519E-01
17	.26140E+00	37	.15584E+00	57	.54594E-01
18	.15978E+00	38	.10767E+00	58	.43913E-01
19	.99928E-01	39	.70470E-01	59	.32756E-01
20	.58713E-01	40	.46493E-01	60	.24315E-01

	блок 2		блок 1		блок 14		блок 13
61	.15992E+0	81	.14460E+0	101	.62396E-	121	.59091E-
	0		0		01		01
62	.41732E-	82	.42019E-	102	.12498E-	122	.11279E-
	02		02		02		02
63	.16624E+0	83	.13358E+0	103	.63284E-	123	.52256E-
	0		0		01		01
64	.47792E-	84	.36786E-	104	.13393E-	124	.11793E-
	02		02		02		02
65	.16119E+0	85	.12263E+0	105	.60325E-	125	.48494E-
	0		0		01		01
66	.50250E-	86	.30103E-	106	.12279E-	126	.88514E-
	02		02		02		03
67	.15755E+0	87	.11081E+0	107	.62063E-	127	.44950E-
	0		0		01		01
68	.45025E-	88	.31184E-	108	.10106E-	128	.14715E-
	02		02		02		02
69	.15363E+0	89	.93709E-	109	.57225E-	129	.39001E-
	0		01		01		01
70	.39259E-	90	.29484E-	110	.11372E-	130	.11405E-
	02		02		02		02

71	.19167E+0	91	.16461E+0	111	.83963E-	131	.76042E-
	0		0		01		01
72	.52147E-	92	.44259E-	112	.20258E-	132	.18791E-
	02		02		02		02
73	.19336E+0	93	.15432E+0	113	.82452E-	133	.72972E-
	0		0		01		01
74	.53183E-	94	.47878E-	114	.16616E-	134	.17529E-
	02		02		02		02
75	.19511E+0	95	.14922E+0	115	.81360E-	135	.62206E-
	0		0		01		01
76	.61434E-	96	.49313E-	116	.16342E-	136	.22715E-
	02		02		02		02
77	.18503E+0	97	.12881E+0	117	.79176E-	137	.60721E-
	0		0		01		01
78	.75705E-	98	.45187E-	118	.14903E-	138	.13335E-
	02		02		02		02
79	.17664E+0	99	.10787E+0	119	.79046E-	139	.50275E-
	0		0		01		01
80	.56356E-	100	.42430E-	120	.16485E-	140	.11432E-
	02		02		02		02

Таблица 2 Энерговыделение в ячейках модели мишень-бланкет в реальной геометрии (мэв/см**3 протон), эксперимент 2

1	.21514E+01	21	.67271E+00	41	.65113E-01
2	.23371E+01	22	.75489E+00	42	.78612E-01
3	.22510E+01	23	.77497E+00	43	.89619E-01
4	.21956E+01	24	.76315E+00	44	.93732E-01
5	.21563E+01	25	.72836E+00	45	.94566E-01
6	.19740E+01	26	.68835E+00	46	.10049E+00
7	.17822E+01	27	.63338E+00	47	.10198E+00
8	.15759E+01	28	.58401E+00	48	.99930E-01
9	.13876E+01	29	.52482E+00	49	.97527E-01
10	.12015E+01	30	.47264E+00	50	.92087E-01
11	.57985E+00	31	.31413E+00	51	.14575E+00
12	.10467E+01	32	.42924E+00	52	.92148E-01
13	.88425E+00	33	.38230E+00	53	.85403E-01
14	.77821E+00	34	.33793E+00	54	.80908E-01
15	.65779E+00	35	.30020E+00	55	.73807E-01
16	.55458E+00	36	.26979E+00	56	.70441E-01
17	.40410E+00	37	.21924E+00	57	.64354E-01
18	.26226E+00	38	.15606E+00	58	.52983E-01
19	.15902E+00	39	.10559E+00	59	.42415E-01
20	.97716E-01	40	.70999E-01	60	.32089E-01

	блок 2		блок 1		блок 14		блок 13
61	.16532E+00	81	.14126E+00	101	.64065E-01	121	.51152E-01
62	.50153E-02	82	.33302E-02	102	.15029E-02	122	.94633E-03
63	.15680E+00	83	.16344E+00	103	.57901E-01	123	.53806E-01
64	.39169E-02	84	.38073E-02	104	.10551E-02	124	.11432E-02
65	.14069E+00	85	.17106E+00	105	.56798E-01	125	.59690E-01
66	.37105E-02	86	.43011E-02	106	.11603E-02	126	.10277E-02
67	.13114E+00	87	.17525E+00	107	.50565E-01	127	.61709E-01
68	.38137E-02	88	.42568E-02	108	.83862E-03	128	.15250E-02
69	.11491E+00	89	.17759E+00	109	.45507E-01	129	.64125E-01
70	.32822E-02	90	.50005E-02	110	.24008E-02	130	.10942E-02
71	.18992E+00	91	.17564E+00	111	.84085E-01	131	.70962E-01
72	.56787E-02	92	.55450E-02	112	.20237E-02	132	.12395E-02
73	.18032E+00	93	.19248E+00	113	.78436E-01	133	.77091E-01
74	.54827E-02	94	.50826E-02	114	.15203E-02	134	.13769E-02
75	.17085E+00	95	.20389E+00	115	.72723E-01	135	.83268E-01
76	.55404E-02	96	.71807E-02	116	.14927E-02	136	.19201E-02
77	.14972E+00	97	.20829E+00	117	.67358E-01	137	.84518E-01
78	.44021E-02	98	.66345E-02	118	.15116E-02	138	.18594E-02
79	.13998E+00	99	.20227E+00	119	.57855E-01	139	.85781E-01
80	.47081E-02	100	.57141E-02	120	.16342E-02	140	.16511E-02