

## Эксперименты по нейтрализации радиоактивности и обработка их результатов

### Проведение экспериментов

В целях практической проверки возможности нейтрализации радиоактивности внутри твердотельной мишени за счет инициирования в ней саморазвивающегося коллапса в лаборатории «Протон-21» (на арендуемой территории в институте ядерных исследований) было проведено около ста экспериментов с мишенями из радиоактивных материалов, получивших название «Эксперименты по нейтрализации радиоактивности».

При их проведении использовались мишени из частично активированного кобальта или серебра. Мишень помещалась в центре специально изготовленного герметичного корпуса (камеры), что исключало утечку радиоактивного вещества.

В результате высокоэнергетического воздействия электронным пучком мишень взрывалась, и ее остатки распылялись по внутренней поверхности корпуса.

Измерения активности проводились до и после эксперимента с расстояния 770 мм при различных положениях корпуса (см. рис.1) с помощью германий-литиевого гамма-детектора ДГДК-100 В-3 по основным спектральным линиям вещества мишени. Смена положения осуществлялась поворотом корпуса вокруг его оси симметрии на 90 градусов. Таким образом проводилось по 10 измерений (положения 1–10) до и после эксперимента. Выводы о количестве оставшейся активности делались по результатам сравнения замеров до и после экспериментов.

### Методы оценки оставшейся активности и возникающие при этом проблемы

Основной проблемой при определении оставшейся активности является частичное или полное распределение вещества мишени по стенкам корпуса. Вследствие достаточно сложной формы корпуса перераспределение вещества существенно изменяет характер поглощения излучения деталями камеры. Изменение поглощения необходимо учитывать при сравнении результатов измерения активности до и после эксперимента. Это тем более существенно в связи с тем, что в настоящее время степень нейтрализации в большинстве экспериментов не превышает 10%. В этом случае всегда найдутся оппоненты, которые поставят под сомнение протекание процесса нейтрализации как такового, объяснив уменьшение счета детектора увеличением поглощения гамма-квантов после перераспределения активности внутри корпуса.

Таким образом, для четкого доказательства существования процесса нейтрализации в экспериментах «Протон-21» необходимо учитывать все, даже незначительные факторы при определении степени нейтрализации.

Для оценки влияния поглощения излучения элементами корпуса после перераспределения активного вещества в объеме герметичной камеры можно использовать ряд косвенных методов:

- 1) расположить калиброванные источники радиоактивности в различных точках внутренней поверхности корпуса и, проводя замеры, вывести некоторое усреднённое значение величины поглощения излучения;
- 2) поскольку коэффициент поглощения излучения зависит от энергии квантов, то для оценки ослабления излучения в деталях камеры можно использовать соотношение показаний спектрометра по различным спектральным линиям излучения;
- 3) логично предположить, что основные тенденции распределения вещества в объеме корпуса повторяются от эксперимента к эксперименту; тогда, последовательно

смывая распыленную активность с различных участков внутренней поверхности камеры можно оценить распределение.

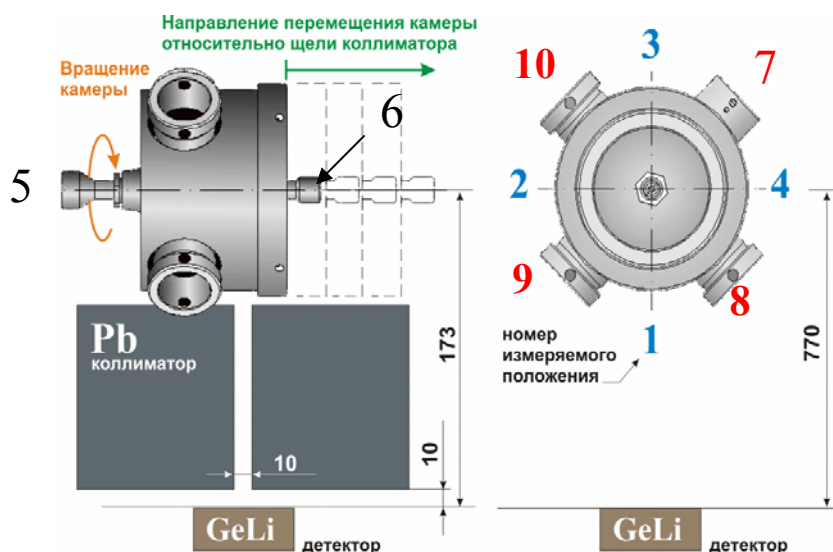


Рис. 1. Схема измерений распределения активности в камере с коллиматором (а) и без него (б)

Вычислив изменение показаний спектрометра и, внося поправку на изменение свойств поглощения, можно оценить количество оставшегося радиоактивного вещества.

Недостатком таких подходов является то, что в первом случае используются, в той или иной степени, предположения о характере распределения активности в корпусе после эксперимента. Во втором же и третьем случаях результаты можно использовать лишь как оценочные. Также большие затруднения вызывает расчет погрешности полученного результата.

### Прямой и точный метод определения количества активности

Методика расчета, которая не вызывала бы сомнений, должна основываться только на результатах измерения излучения и давать как максимально, так и минимально возможное значение количества радиоактивного вещества в корпусе. Такой подход приводит к классической задаче математического программирования: найти такую функцию распределения вещества взорванной мишени в корпусе, которая, удовлетворяя всем проведенным измерениям, как ограничениям, максимизирует (минимизирует) суммарное количество радиоактивного вещества.

Необходимость решения этой конкретной проблемы привела к появлению достаточно универсальной методики расчёта количества радиоактивного вещества в сборной конструкции. При этом было учтено, что составные части объекта имеют сложную, но известную топологию и сделаны из различных материалов; сам объект исследования не подлежит разборке, т.е. возможны только интегральные замеры активности в условиях сложного характера поглощения излучения составными частями объекта; отсутствует достоверная информация о характере распределения радиоактивного вещества в объекте.

Задачу математического программирования удалось свести к хорошо изученной задаче линейного программирования, что позволило достаточно эффективно решать её на доступной компьютерной технике. Для этого на основании трёхмерной геометрической модели корпуса, отражающей ее фактические размеры с погрешностью менее 0,01 см, была построена сетка на её внутренней поверхности. Количество радиоактивного

вещества в каждом узле сетки возможных сосредоточений активности описывалось отдельной свободной переменной. Рассчитав, на основе модели корпуса, коэффициент ослабления излучения на пути от каждой точки внутренней поверхности корпуса до спектрометра, его показания можно представить в виде линейного уравнения относительно неизвестных масс вещества в узлах сетки. Учитывая, что измерения проводятся с погрешностью, каждое уравнение представляется в виде двух неравенств. Построенные для всех проведенных измерений неравенства составляют систему ограничений для задачи линейного программирования. В качестве целевой функции берётся суммарное количество вещества во всех узлах сетки. Данная задача решалась нахождение минимума и максимума.

Очевидно, что реальное количество активного вещества в корпусе находится между найденными минимумом и максимумом. Ширина этого диапазона уменьшается при увеличении количества проведенных измерений.

Для одного из корпусов, использованного в эксперименте по нейтрализации, было дополнительно проведено (в положениях 1–4) 64 измерения с  $\alpha$ -щелевым свинцовым коллиматором (рис.1а), что позволило установить количество радиоактивного вещества с точностью около 1%. Это количество составило 90,06% – 91,81% от исходного.

При преобразовании равенств в неравенства учитывалась статистическая погрешность показаний спектрометра ( $\pm 2,5\%$ ) и погрешность математической модели ( $\pm 0,3\%$ ), полученная путём прогонки методики на известных априори данных. Суммарная учтённая погрешность составила  $\pm 2,8\%$ .

Заметим, что в данной методике результат был получен только на основании результатов измерений без использования каких-либо предположений. Такой подход позволил учесть все факторы возможных ошибок. Полученные результаты расчётов убедительно и строго доказывают факт нейтрализации в данном эксперименте не менее 8% радиоактивного изотопа  $^{60}\text{Co}$ , атомы которого предположительно равномерно располагались в теле мишени после ее активирования реакторными нейтронами.

В результате решения задачи было получено некоторое распределение радиоактивного вещества в узлах сетки. Заметим, что приведенный метод не позволяет с высокой точностью определить реальное распределение активности по внутренней поверхности корпуса, хотя позволяет оценить расположение участков внутренней поверхности с повышенной концентрацией радиоактивного вещества (рис.2–3). На рис.2 схематически показаны: вид сверху на камеру с номерами положений измерений; разрезы камеры (без крышки) до и после эксперимента. На рис.3 – камера разрезанная на сектора в соответствии с номерами положений.

## Выводы

Опираясь только на результаты измерений, не используя никаких предположений, разработанная методика позволяет:

1. Определить с необходимой точностью суммарное количество активности в недоступном замкнутом объекте.
2. С достаточной достоверностью локализовать «пятна» концентрации активности.
3. Для проведения измерений использовать недорогой и доступный измерительный комплекс.
4. Применять для проведения расчетов общеупотребительную вычислительную технику (время расчёта для одного измерения составляло около 7 минут на компьютере с процессором Intel Pentium III)

Уменьшение суммарной активности внутри герметичной камеры не могло произойти без протекания ядерных реакций. Следовательно, использованная методика

еще раз подтвердила факт протекания ядерных реакций в установке лаборатории «Протон-21» при проведении экспериментов по ударному сжатию вещества.

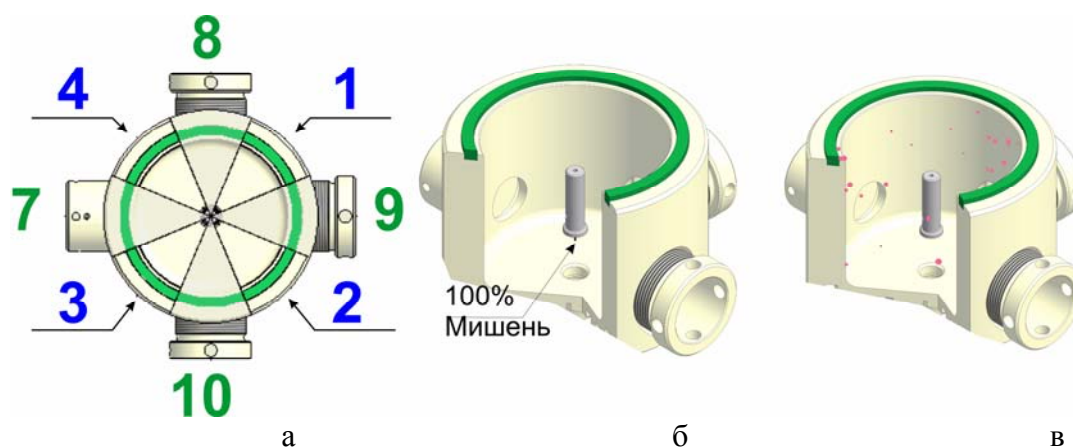
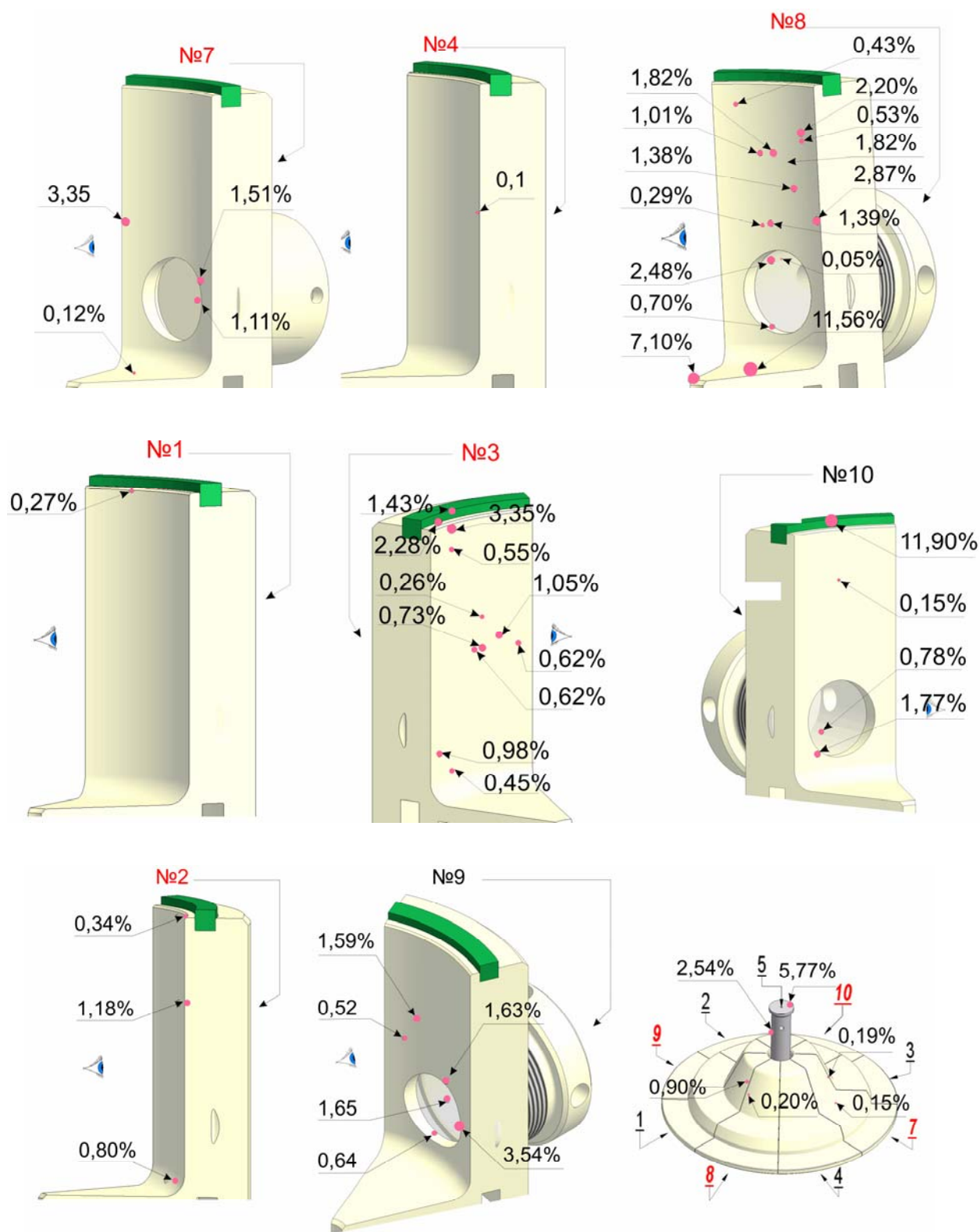


Рис.2. Схематическое изображение корпуса:

а – вид сверху;

б – корпус в разрезе до эксперимента (без крышки);

в – корпус в разрезе после эксперимента (без крышки)



● – узел сетки возможных сосредоточений активности; диаметр круга пропорционален расчетному количеству оставшейся активности в узле и его окрестности

7,10% – количество оставшейся активности в % от начальной

Рис.3. Схематическое изображение секторов корпуса с указанием расчетного распределения оставшейся активности