



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Применение программы ПРИЗМА для моделирования фотонейтронных источников на базе линейных ускорителей

К.С.Волосенко, О.В.Зацепин, И.В.Пензин, С.И.Самарин, В.М.Шмаков

Российский Федеральный Ядерный Центр Всероссийский Научно-Исследовательский Институт
Технической Физики имени академика Е.И.Забабахина (РФЯЦ-ВНИИТФ)

XVII Международная конференция «ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ»
19–23 мая 2025 г. Снежинск

Программа ПРИЗМА. Современное состояние



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

- Раздельный и совместный перенос нейтронов, фотонов, электронов, позитронов и ионов
- Линейные задачи с источником
- Условно-критические задачи
- Современные библиотеки данных о взаимодействиях
- Богатые возможности описания геометрии
- Источники с табличными и аналитическими распределениями
- Разнообразные результаты
- Методика коррелированных расчетов
- Неаналоговое моделирование
- C++, ОС Windows, Linux, распараллеливание

Геометрия



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

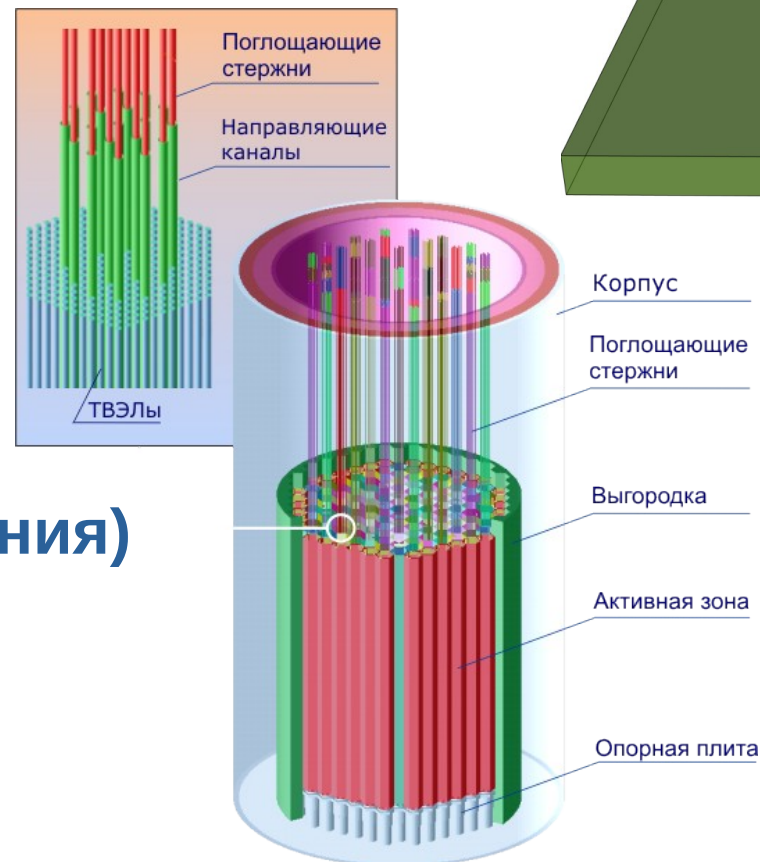
Блоки:

- Одномерные — плоский, сферический, цилиндрический
- Двумерные — осесимметричные, цилиндрические
- Трехмерные:
 - Комбинаторное описание
 - Описание кусками поверхностей

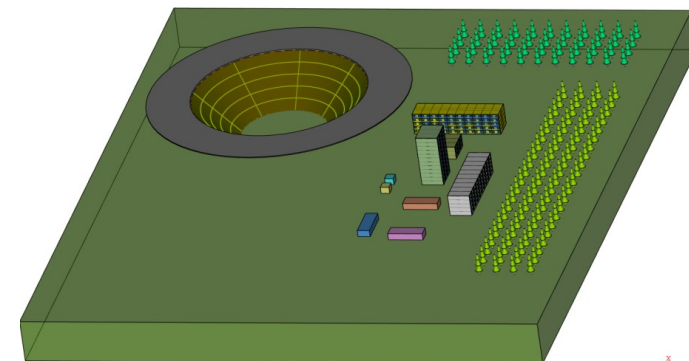
Решетки 2D и 3D (возможны вложения)

Стохастическая геометрия

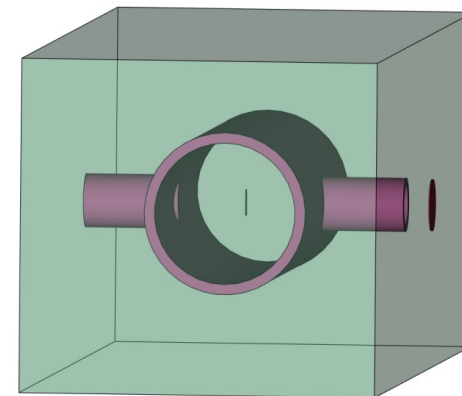
ВВЭР - 1000



Модель местности



Конструкции экспериментальных установок



В общем случае в рассчитываемой системе может быть задано несколько независимых источников, каждый из которых характеризуется типом испускаемых частиц, вероятностью, пространственным распределением частиц и их распределением по энергии, углу и времени.

Пространственно источник может быть точечным, линейным, поверхностным или объемным.

Задание геометрии источника:

- Равномерно по объему произвольной геометрической области или по площади геометрических поверхностей
- Автономно с использованием широкого набора примитивов.

Для описание **энерго-углового и временного распределения** частиц источника предусмотрена возможность задания одномерных аналитических распределений или 1-,2- и 3-мерных табличных распределений.



- Оценка линейных функционалов от решения уравнения переноса на любых геометрических поверхностях системы и внутри ее областей
 - Поверхностные результаты: токи и потоки частиц и энергии
 - Областные результаты: плотность, поток частиц, плотность столкновений, поглощенная энергия, число реакций, процессов, частиц определенного типа и ряд других
- Любые функционалы могут быть дифференцированы по пространству, времени, направлению полета частиц и энергии
- Возможность выделения вклада частиц, траектории которых удовлетворяют определенным условиям
- Многовариантные коррелированные расчеты, оценка эффекта возмущения следующих видов:
 - Перемещение области возмущения
 - Нарастание области возмущения
 - Изменения состава
 - Изменение плотности



- Разработан метод моделирования по ценности, позволяющий адаптировать алгоритмы моделирования к особенностям конкретной задачи
- Данный метод включает в себя предварительное построение приближенной функции ценности частиц и вычисление на ее основе весовой функции и параметров неаналогового моделирования
- Моделирование по ценности применяется при решении следующих задач (и их комбинаций)
 - Прохождение излучения через большие оптические толщины
 - Моделирование процессов взаимодействия, имеющие малые вероятности
 - Прохождение излучения в детекторы, расположенные в вакууме или чистом поглотителе
 - Прохождение излучения в детектор, расположенный в излучающей и рассеивающей среде

Взаимодействие частиц с веществом



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Нейтроны

Библиотеки:

ENDF/B-V,-VI,-VII, РОСФОНД, CENDL, JENDL, JEFF, TENDL и др.

Диапазон энергий: 10^{-5} эВ — 150 МэВ

Модель учета теплового движения среды:

модель свободного газа, метод мажорирующего сечения.

Модель учета химической связи атомов вещества в состоянии термодинамического равновесия **с учетом** когерентного упругого, некогерентного упругого и некогерентного неупругого рассеяний.

Фотоны

Библиотеки: EPDL-92, EPDL-97

Диапазон энергий: 100 эВ — 100 МэВ

Электроны и позитроны

Библиотеки:

EADL и аналитическое представление дважды дифференциальных сечений

Диапазон энергий: 1 кэВ — 100 МэВ

Модель укрупненных и катастрофических соударений

Ионы

Библиотеки:

TNRDAT и аналитическое представление сечений

Диапазон энергий: 100 эВ — 300 МэВ

Модель катастрофических соударений

Задача создания фотонейтронного источника на базе линейного ускорителя

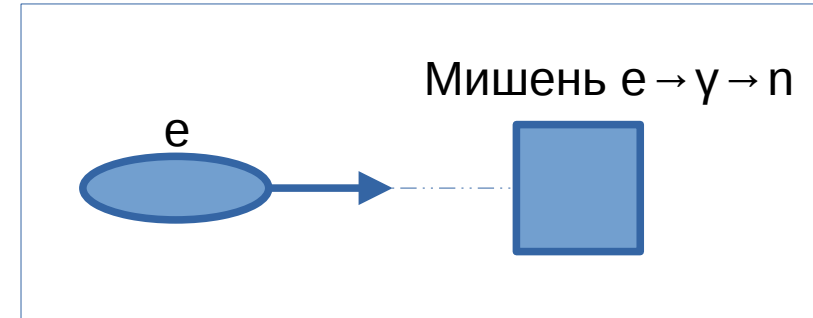


РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

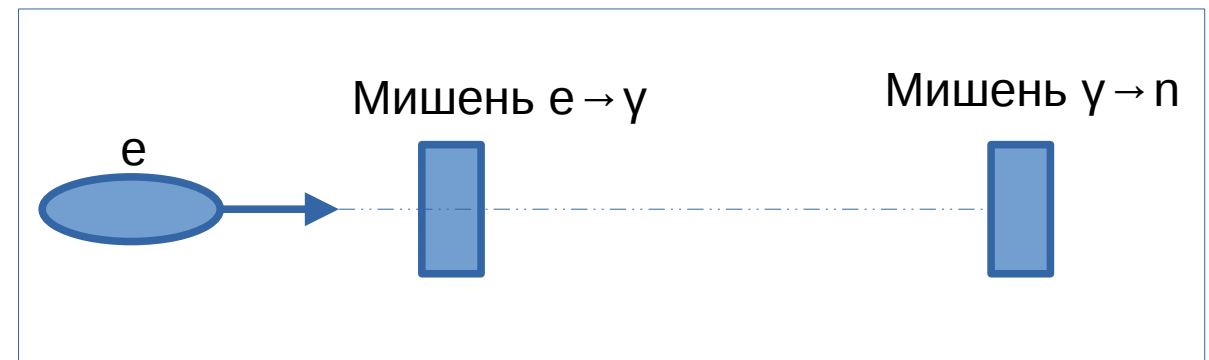
Создание фотонейтронного источника на основе фотоядерных реакций:

- Поток нейтронов зависит от количества и энергии электронов, а также от **материала конверсионной мишени и ее конструкции**
- Определение **спектра выходящих нейтронов** для выбора методики измерения нейтронных потоков
- Создание констант, описывающих фотоядерные взаимодействия
- Модификация кода ПРИЗМЫ и отработка технологии расчета задач с учетом фотоядерных взаимодействий

Однородная мишень (Ta, W, Pb, U)



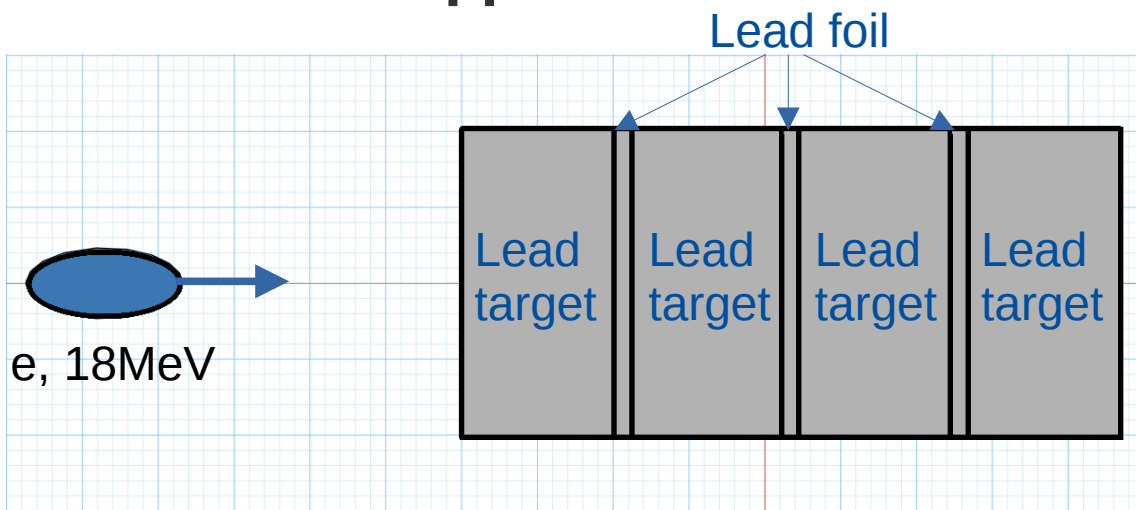
Комбинированная мишень (Ta, W) + (Pb, U, Be)



Сравнение результатов ПРИЗМА и MCNPX на тестовой задаче*



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



Состав:

$\text{Pu}^{208}_{52.647}$ $\text{Pu}^{207}_{22.94}$ $\text{Pu}^{206}_{24.44}$

Фотонные константы: EPDL-90 +
фотоядерные данные из библиотеки ENDF/B-VII
Нейтронные константы: ENDF/B-V

	Эксперимент	MCNPX	ПРИЗМА
Lead foil 1, neutron/electron	9.43E-04	9.33E-04 (-1.06%)	9.41E-04 (-0.11%)
Lead foil 2, neutron/electron	6.30E-04	5.70E-04 (-9.52%)	6.86E-04 (+8.89%)
Lead foil 3, neutron/electron	4.13E-04	3.09E-04 (-25.2%)	5.09E-04 (+23.24%)

Заявленная погрешность эксперимента ~ 20%.

Фотонейтронный источник на базе линейного ускорителя



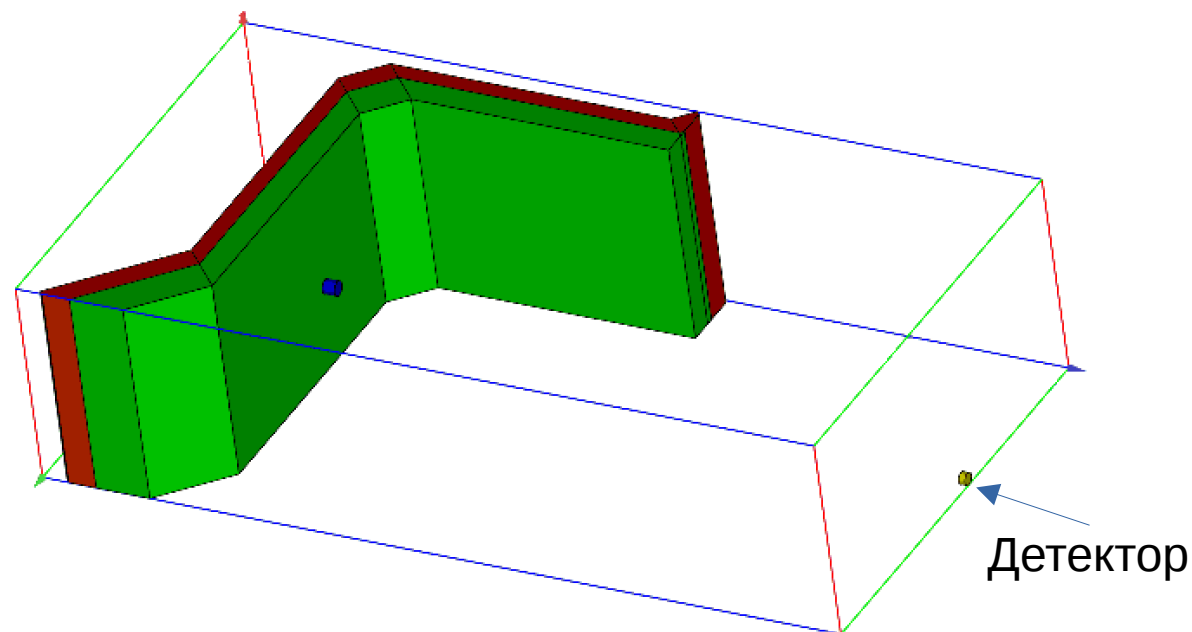
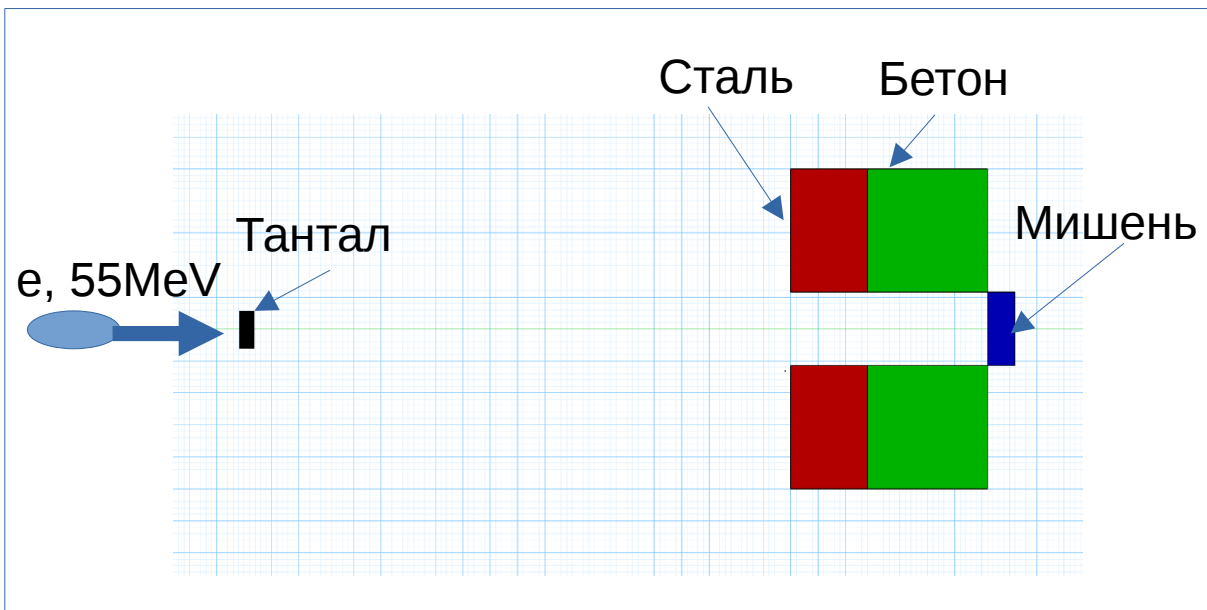
РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

- Эксперименты проводились в РФЯЦ-ВНИИТФ
- Для формирования потока тормозных квантов использовались: рентгенографическая установка БИМ234.3000М и линейный индукционный ускоритель ЛИУ-20

	БИМ234.3000М	ЛИУ-20
Энергия источника	55МэВ	20МэВ
Длительность импульса	130нс	60нс
Количество электронов	$6.25e^{12}$	$7.5e^{14}$



ЛИУ-20

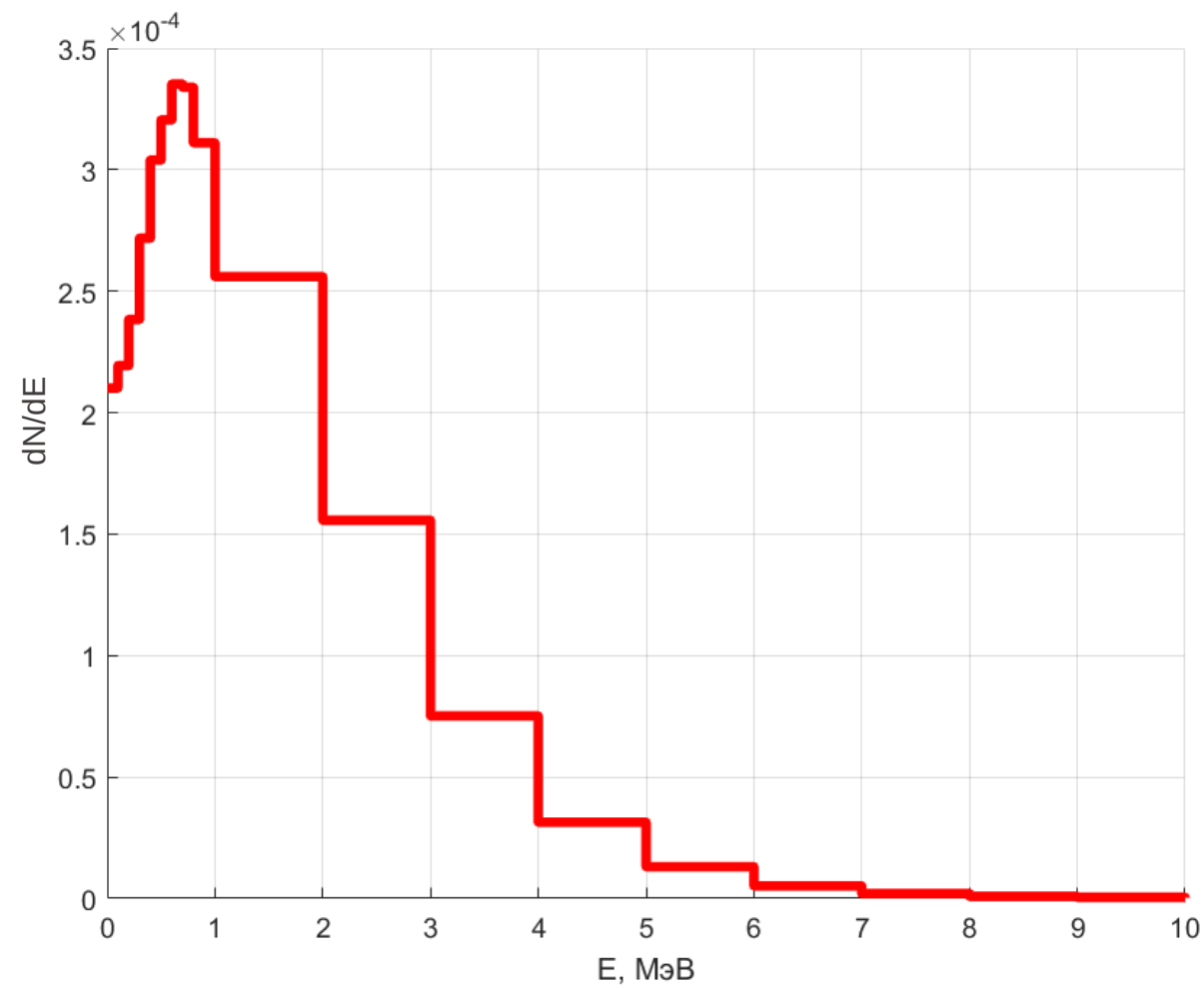
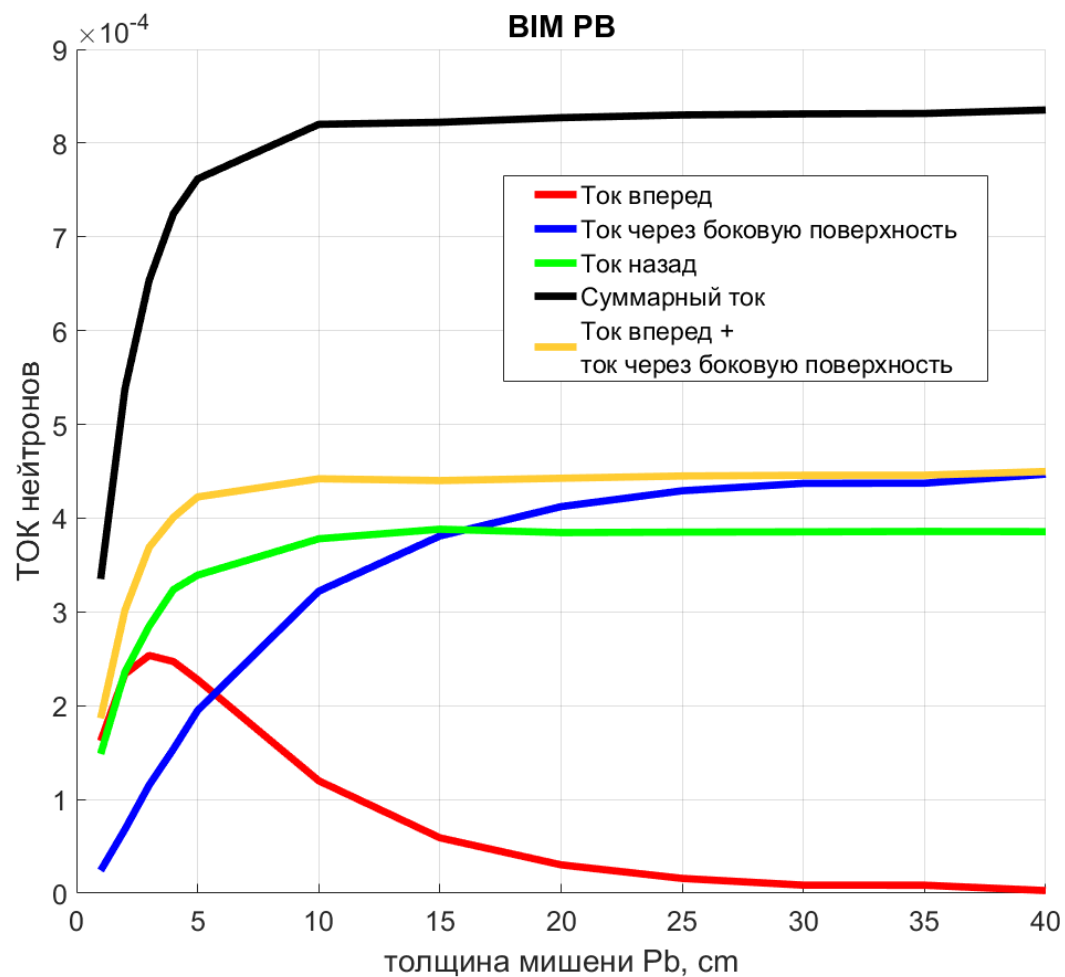


- Состав мишени $e \rightarrow \gamma$: Ta, состав мишени $\gamma \rightarrow n$: Pb
- Константы для фотонов: EPDL-90 (фотоатомные) + ENDF/B-VII (фотоядерные), для нейтронов: ENDF/B-V (до 20 МэВ) + данные библиотеки D2N2, Сычев Б.С (после 20 МэВ)
- Алгоритмы неаналогового моделирования:
 - Повышение вероятности движения частиц в сторону мишени и детектора
 - Повышение вероятности фотоядерных взаимодействий
- Поэтапное добавление в расчетную модель грунта и стен каземата

Результаты расчетов, БИМ234.3000М



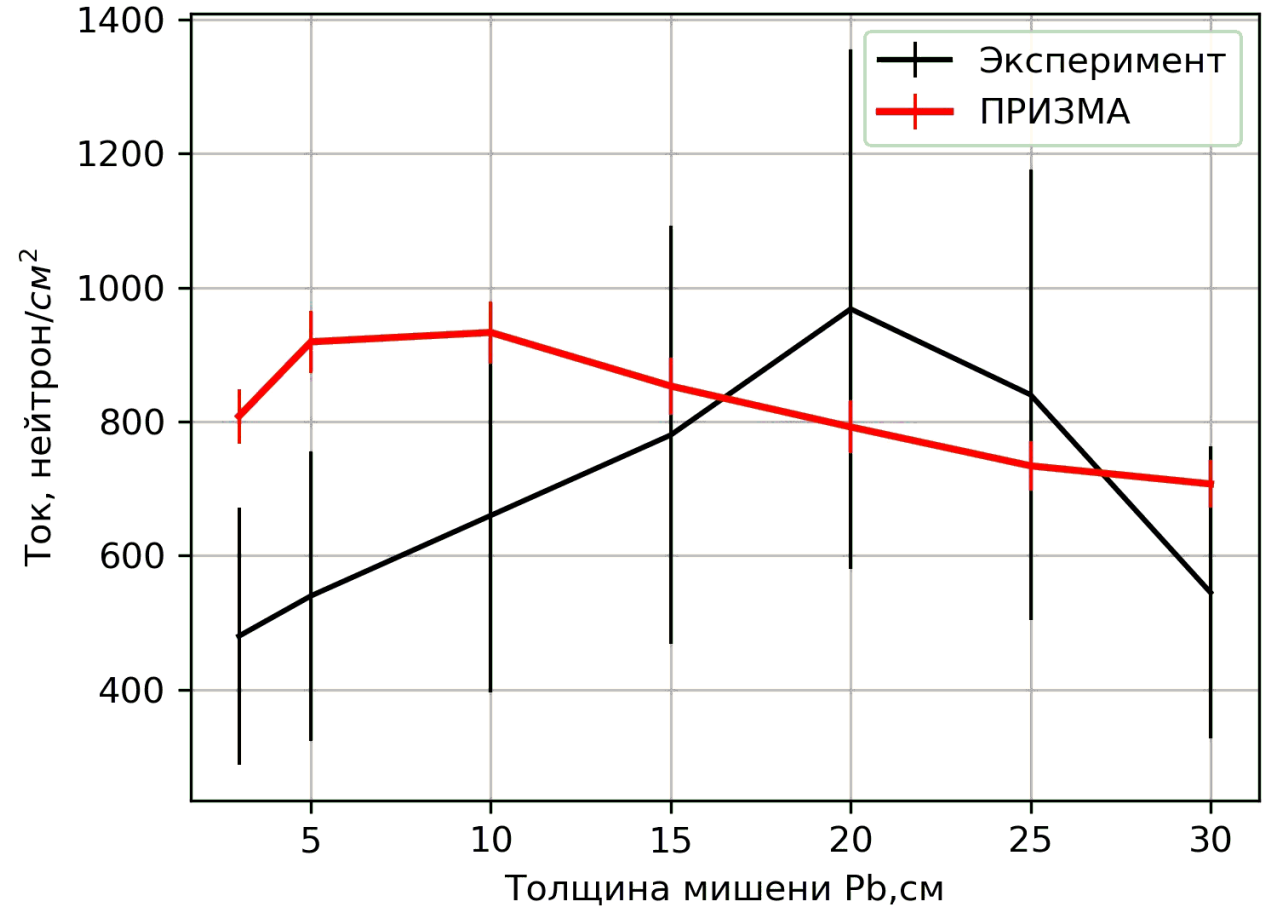
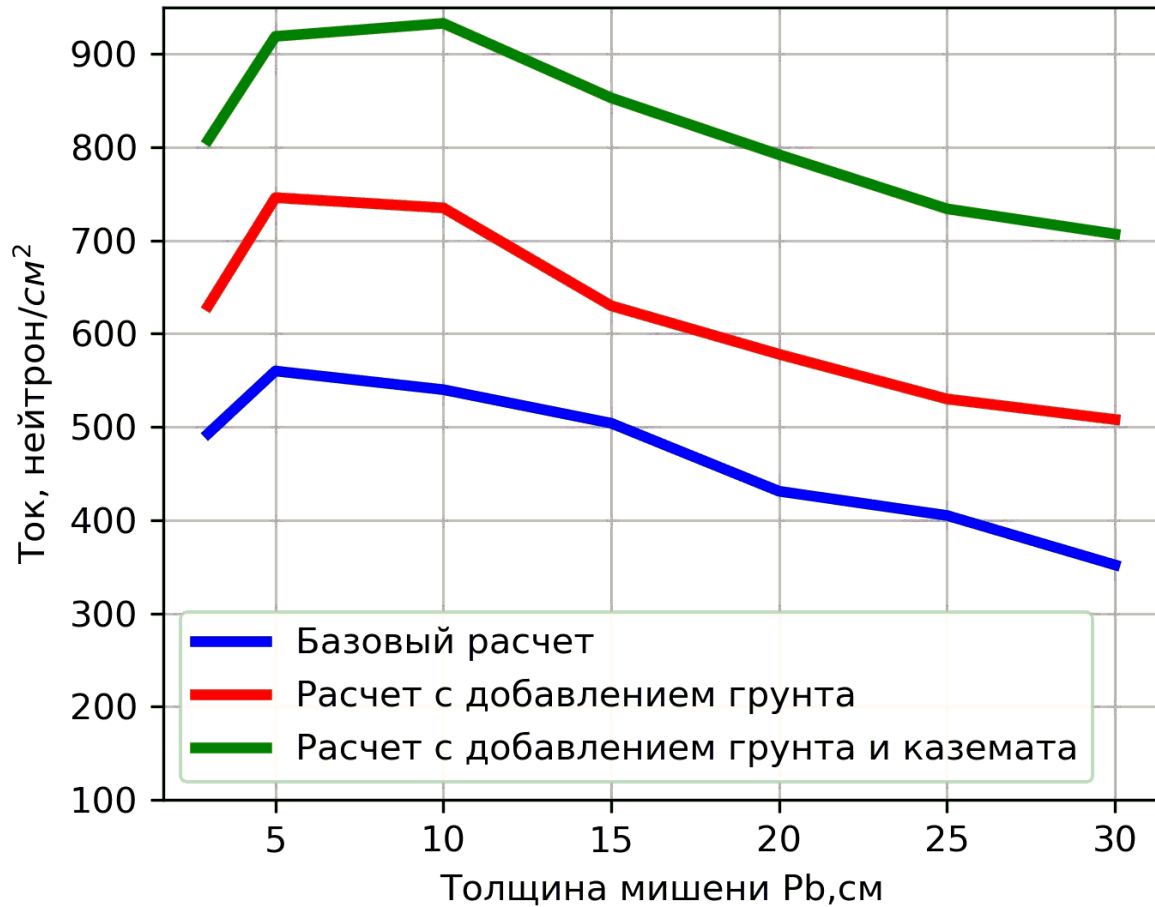
РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

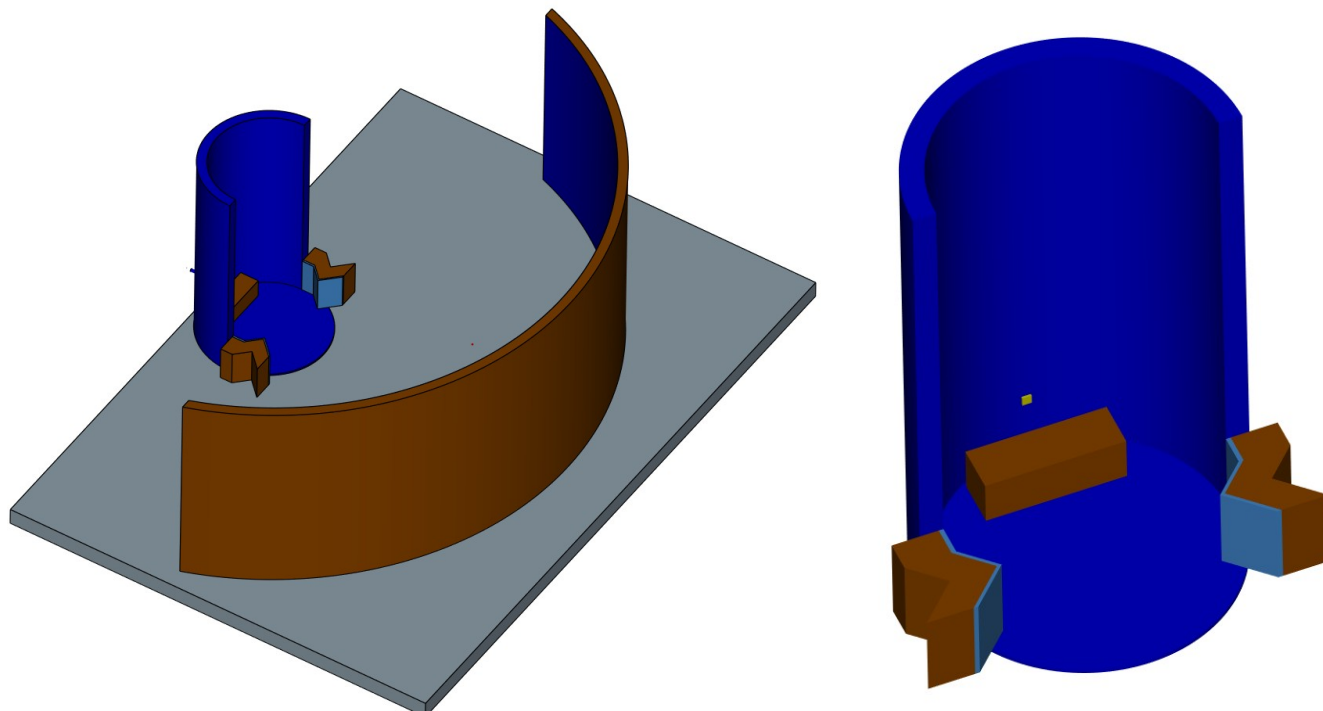


Результаты расчетов, сравнение с экспериментом, БИМ234.3000М



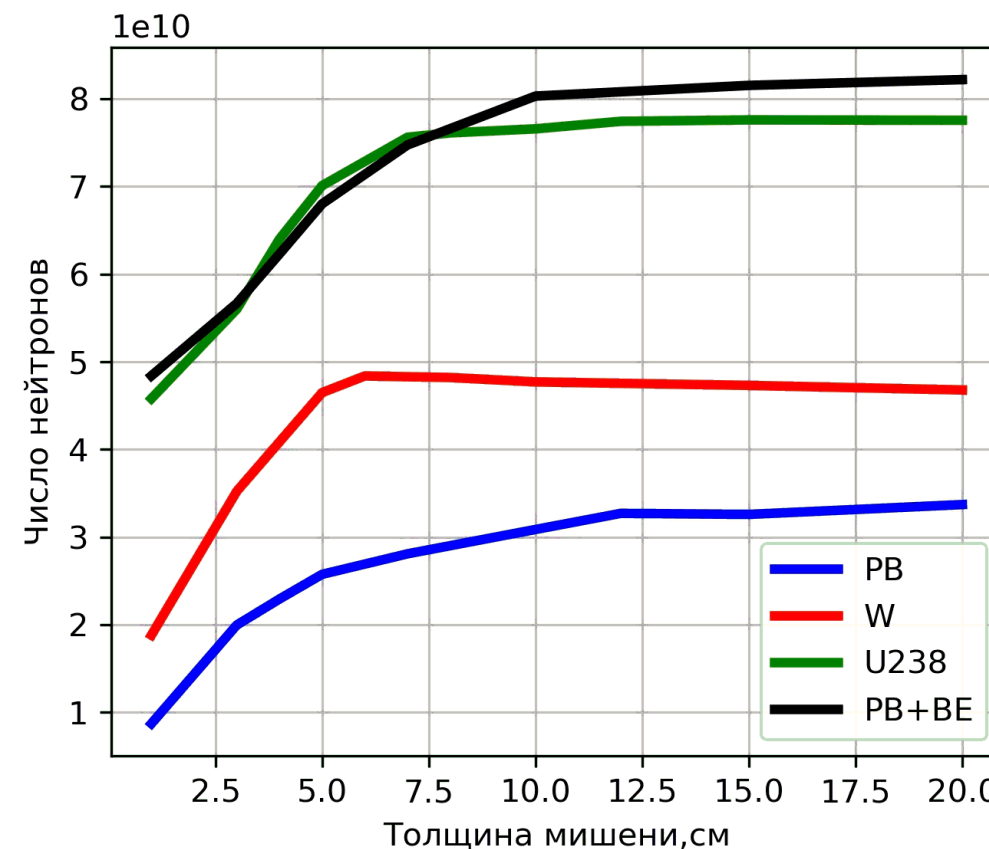
РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ





Состав мишени $e \rightarrow \gamma$: Ta,
Состав мишени $\gamma \rightarrow n$: W, U, Pb, Pb+Be

Энергия источника: 20МэВ





- В программе ПРИЗМА реализована возможность моделирования фотоядерных реакций
- Созданы константы, описывающие фотоядерные взаимодействия
- Исследовано влияние конфигурации конверсионных мишеней и окружения установки на интенсивность и мощность выхода нейтронов
- На основе полученных расчетных данных обоснована концепция мощного генератора комплексного гамма-нейтронного излучения с возможностью изменения интенсивности гамма и нейтронной составляющей в импульсе для исследований в области радиационной стойкости.

Спасибо за ВНИМАНИЕ

Волосенко Ксения Сергеевна, О.В.Зацепин, И.В.Пензин, С.И.Самарин, В.М.Шмаков

Российский Федеральный Ядерный Центр Всероссийский Научно-Исследовательский Институт
Технической Физики имени академика Е.И.Забабахина (РФЯЦ-ВНИИТФ)

XVII Международная конференция «ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ»
19–23 мая 2025 г. Снежинск

Список литературы

- Y.Z. Kandiev, K.E. Khatuntsev, O.V. Zatsepin et.al., "PRIZMA Status". Annals of Nuclear Energy. 2015, Volume 82, p. 116-120.
- Ya.Z. Kandiev, G.N. Malyshkin, O.V. Zatsepin et. al., "PRIZMA Status", Proceedings, Joint International Conference on Supercomputing in Nuclear Applications and Monte Carlo, 27-31 October 2013, Paris, France (2013). [CD-ROM]
- О.В. Зацепин, Я.З. Кандиев. Методика моделирования по ценности для решения по программе «ПРИЗМА» задач глубокого прохождения и детектирования реакторной физики // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2015. – Вып. 1. – С. 30-36.
- Ya.Z. Kandiev, G.N. Malyshkin, "Modeling by Value Implemented in PRIZMA Code", V Joint Russian-American Computational Mathematics Conference, Sandia Report, SAN98-1591, 149 (1998).
- Shmakov V.M., Lyutov V.D., Cherepanova E.I., Yazovskikh G.L., Orlov G.V., Klimova L.A., Use ENDF-Format Libraries for Criticality Calculations at VNIITF, // In: Proc. the Sixth International Conference on Nuclear Criticality Safety ICNC'99, Versailles, France (CD-ROM), P1_24, Sept 20-24, 1999.
- Кандиев Я.З. Куропатенко Э.С., Шмаков В.М., Черепанова Е.И. Библиотеки системы константного обеспечения расчетов КОБРА. Использование библиотек ENDL, ENDF. Вопросы атомной науки и техники, сер. Методики и программы численного решения задач математической физики, 1986, №1.
- Плохой В.В. Моделирование переноса быстрых заряженных частиц в задачах радиационной физики / В.В. Плохой -Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2018. - 196с.: ил.
- Адеев А.В., Адеева А.В., Павлова Н.П. О геометрическом обеспечении расчетов Монте-Карло в РФЯЦ-ВНИИТФ. Препринт № 160, РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, 1999.
- Я.З.Кандиев, Е.А.Кашаева, Г.Н.Малышкин. Описание источников излучений при решении задач переноса методом Монте-Карло в РФЯЦ-ВНИИТФ. - Препринт № 176. РФЯЦ-ВНИИТФ, Снежинск, 2001.
- Suresh Babu Sadineni. "Benchmarking photoneutron production of Mcnpx simulations with experimental results", UNLV Retrospective Theses & Dissertations, 2002.
- Laurie S.Walters, "MCNPX user`s manual, Version 2.1.5"
- I.V. Penzin, D.V. Petrov, O.A. Nikitin, A.R. Akhmetov, S.D. Khrenkov, R.V. Protas, E.I. Chukhaev, K.S. Volosenko, D.N. Shepelev. "Photoneutron Source Based on Linear Induction Accelerator", SOCHI, IYNC2022.
- Инструменты статической и импульсной рентгенографии: сборник научных трудов. / под ред. О.А.Никитина и Р.В.Протаса. - Снежинск : изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ, 2023.