

УДК 621.039.6.61

КАЛИБРОВКА НЕЙТРОННЫХ МОНИТОРОВ МГНОВЕННОЙ МОЩНОСТИ ИТЭР. ОТКЛИКИ МОНИТОРОВ НА МОДЕЛИ РЕАЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ DT-, DD- и Cf-НЕЙТРОНОВ

*А.А. Борисов, Н.А. Дерябина, Д.В. Марковский**НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия*

Мгновенная мощность является ключевым параметром реактора ИТЭР. Её мониторинг с точностью несколько процентов представляет актуальную и сложную задачу нейтронной диагностики. В серии статей поэтапно проводится расчётное нейтронно-физическое обоснование методики калибровки на реакторе ИТЭР для DT- и DD-режимов. Для численного интегрирования откликов детекторов ^{235}U и ^{238}U на точечные источники нейтронов 14 МэВ используется схема квадратур Гаусса, оптимальная для обработки «дорогостоящих» экспериментов. Такой подход позволяет контролировать точность интегрирования в зависимости от числа узлов по координатам и таким образом минимизировать число облучений при заданной погрешности отклика монитора на штатный источник. В предыдущих статьях приведены расчёты по программе MCNP в модели реактора ИТЭР откликов диверторного и бланкетных мониторов на точечные изотропные источники DT-нейтронов в профиле плазмы. При замене точечного источника моделью нейтронного генератора (НГ) отклики мониторов изменяются вследствие физических отличий генератора от идеального источника: анизотропии вылета нейтронов из мишени, дополнительного источника медленных нейтронов в водородосодержащих материалах НГ и экранирования конструкцией НГ потока первичных (термоядерных) нейтронов в мониторах. Эффекты анизотропии выхода нейтронов в генераторах в зависимости от ориентации пучка дейтронов варьируют от ~10% для DT- до ~40% для DD-нейтронов. Дополнительный источник медленных нейтронов в материалах генератора вызывает суммарное (с анизотропией) увеличение откликов для DT-нейтронов на 15—20%. Для DD-нейтронов этот эффект маскируется сильной зависимостью откликов от углов вылета нейтронов из источника, и суммарный эффект может составлять 40—60%. Расчёты моделей реактора с различной ориентацией генератора DT-нейтронов показали, что наиболее целесообразным для калибровки является горизонтальное расположение генератора с ориентацией пучка дейтронов по касательной к эквивалентному кольцу. Поправки к средним по азимуту значениям откликов для перехода от нейтронного генератора к точечному изотропному источнику в этом случае составляют ~15% для монитора нейтронного потока с бериллием и ~20% для микрокамер деления. Вследствие большой анизотропии выхода нейтронов из нейтронного генератора калибровка бланкетных мониторов с источником DD-нейтронов недостаточно надёжна, поскольку требует учёта больших координатно-зависимых поправок к измеренным откликам для перехода к идеальному точечному источнику. Более простой и надёжной представляется перенормировка калибровки, полученной для источника DT-нейтронов.

Ключевые слова: мощность ИТЭР, нейтронный монитор, калибровка, нейтронно-физический расчёт.

CALIBRATION OF ITER INSTANT POWER NEUTRON MONITORS. RESPONSES OF MONITORS TO THE MODELS OF REAL SOURCES OF DT-, DD- и Cf- NEUTRONS

*A.A. Borisov, N.A. Deryabina, D.V. Markovskij**NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

Instant power is a key parameter of ITER. Its monitoring with accuracy of few percent is an actual problem and represents a challenge to neutron diagnostics. The neutron justification of the calibration technique for DT- and DD- modes of ITER operation are step by step considered in a series of articles. A scheme based on the Gauss quadrature, optimal for processing of “expensive” experiments, is used for the numerical integration of ^{235}U and ^{238}U detector responses to point sources of 14-MeV neutrons. Such an approach allows to control the accuracy of integration depending on the number of the coordinate mesh points and, thus to minimize the number of irradiations at the given uncertainty of the full monitor response. The results of the MCNP calculations of the divertor and blanket monitor responses to the point isotropic sources of the DT-neutrons in the ITER plasma profile were considered in the previous articles. At the replacement of a point neutron source with the model of neutron generator (NG), the responses of monitors change due to the physical differences of the NG and the ideal neutron source: anisotropy of neutron yield from a target, the additional source of slow neutrons in hydrogen-containing materials of NG and screening of the primary (thermonuclear) neutron flux in monitors by the NG structure. The effects of neutron yield anisotropy in generators depending on the deuteron beam orientation vary from ~10% for DT- to ~40% for DD-neutrons. The additional source of slow neutrons in the NG materials causes total (with anisotropy) increase in the responses for DT-neutrons in 15—20%. For DD-neutrons this effect is masked by the strong dependence of responses on angles of neutrons emission from a source, and the total effect can amount to 40—60%. Calculations of reactor models with various orientations of DT-neutron generator have shown that the most expedient for calibration is the horizontal arrangement of the generator with deuteron beam oriented along a tangent to an equivalent circle. Corrections to the azimuth average responses for transition from the NG to a point isotropic source in this case amount to ~15% for the neutron flux monitor and ~20% for fission microchambers. Due to the big anisotropy of neutron yield from the NG, calibration of blanket monitors with a source of DD-neutrons looks unreliable since it demands taking into account of the big coordinate-dependent corrections to the measured responses for transition to an ideal point source. More simple and reliable would be renormalizing the calibration received for a DT-neutrons source.

Key words: ITER power, neutron monitor, calibration, neutron analysis.

DOI: 10.21517/0202-3822-2016-39-2-44-57

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа продолжает цикл исследований нейтронно-физических аспектов калибровки нейтронных мониторов мгновенной мощности ИТЭР [1, 6]. На первом этапе [1] были созданы первые варианты моделей нейтронных диагностик, адаптированных к двум новым моделям реактора для расчётов по программе MCNP [3]: модификации базовой модели Alite [4] с углом раствора 40° и специально разработанной на её основе модели реактора с углом раствора 360° . В этих моделях проведено детальное изучение откликов штатного монитора нейтронного потока в диверторе [5], позволившее сформулировать рекомендации по выбору позиций точечного источника с энергией 14 МэВ для интегрирования локальных откликов по схеме Гаусса.

Второй этап исследований [6] был посвящён изучению нейтронных характеристик трёх других нейтронных диагностик, расположенных в бланкете: монитора нейтронного потока с бериллиевым замедлителем в экваториальном порту № 1 (МНПБ) и в верхнем порту (МНПВ) [7], двух микрокамер деления, установленных на вакуумном корпусе реактора за модулями внешнего бланкета № 12 и № 17 (МКД-1 и МКД-2) [8] и детекторов нейтронной активационной системы (НАС) [9], размещённых в щелях между модулями бланкета в полоидальном направлении. Так же, как и при исследовании нейтронно-физических характеристик диверторного монитора, первая серия расчётов откликов детекторов к кольцевому источнику DT-нейтронов была выполнена в модели Alite-R с углом раствора 40° . В следующей серии расчётов модели реактора с углом раствора 360° были определены азимутальные зависимости откликов мониторов на точечные изотропные источники со спектрами нейтронов DT- и DD-реакций синтеза и источник спонтанного деления ^{252}Cf , проанализирован характер сходимости интегралов от этих распределений в зависимости от числа узлов в схеме Гаусса и на этой основе выбраны азимутальные координаты точек источника для процедуры калибровки.

Использование в калибровке вместо идеального точечного изотропного источника, рассматриваемого на предыдущих этапах, реального источника нейтронов в виде нейтронного генератора (НГ) или изотропного источника сопровождается введением в физическую модель облучения детекторов значительных дополнительных материальных масс и анизотропии источника, вызывающих деформацию полей нейтронов в детекторах мониторов по сравнению с полями в идеальной конфигурации. Соответственно для перехода от экспериментальных калибровочных измерений в реальной геометрии к идеальной конфигурации в реакторе необходимо вводить поправки, определяемые из сравнения расчётных величин откликов на реальные и идеальные источники. В данной работе проведены расчёты откликов мониторов на разработанные расчётные модели имитаторов реальных источников (генераторы DT- и DD-нейтронов, радионуклидный источник ^{252}Cf) в выбранных точках расположения идеального точечного источника и обсуждаются необходимые поправки для перехода к натурным условиям.

МОДЕЛИ ИСТОЧНИКОВ НЕЙТРОНОВ

Нейтронный генератор. В качестве материального прототипа источников DT- и DD-нейтронов был выбран перспективный вариант нейтронного генератора НГ-24 разработки ВНИИА (Россия) [10] с предполагаемой интенсивностью DT-нейтронов 10^{11} н/с. Его общая масса оценивается в 280 кг, а ресурс — в 500 ч. Внутренняя полость генератора (рис. 1) высотой 87 см и внешним радиусом 17,8 см заполнена маслом. В нижней части корпуса находится вакуумированная нейтронная трубка с титан-тритиевой мишенью (TiT_2 , плотность $3,7$ г/см³) толщиной 0,6 мм, охлаждаемой слоем воды 2 мм. Над трубкой в пустом объёме расположен магнит. На основе этой конструкции создана трёхмерная геометрическая модель генератора для нейтронных расчётов

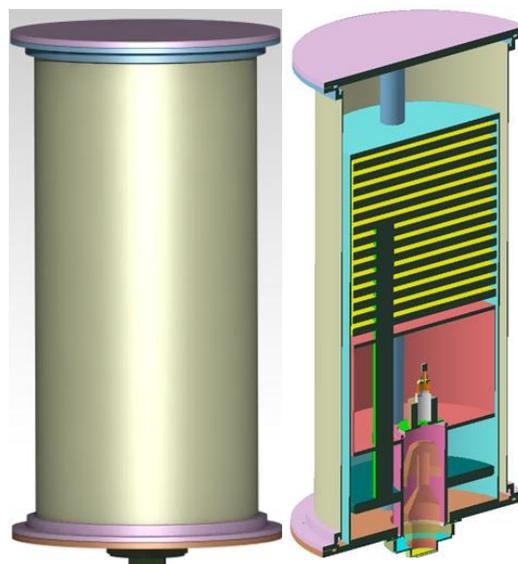


Рис. 1. Схема конструкции нейтронного генератора

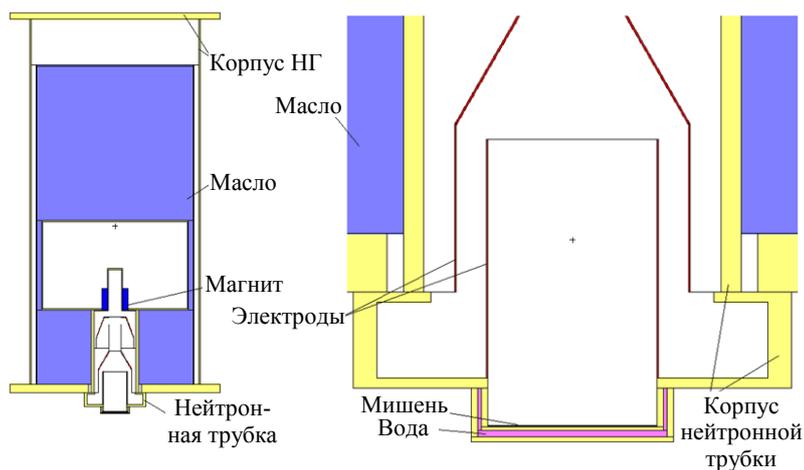


Рис. 2. Схема модели нейтронного генератора

по программе MCNP (рис. 2). Ввиду отсутствия описания кандидатного DD-генератора его материальная модель считалась идентичной модели DT-генератора.

Адекватное отображение условий облучения нейтронным генератором требует дополнения модели манипулятором, обеспечивающим его позиционирование в камере ИТЭР (рис. 3). Ввиду отсутствия к моменту проведения расчётов реальной конструкции манипулятора он моделировался стальной трубой радиусом 25,5 см и толщи-

ной стенки 2,5 см с кронштейном на конце для крепления генератора. Модель допускает поворот генератора в модели реактора (рис. 4).

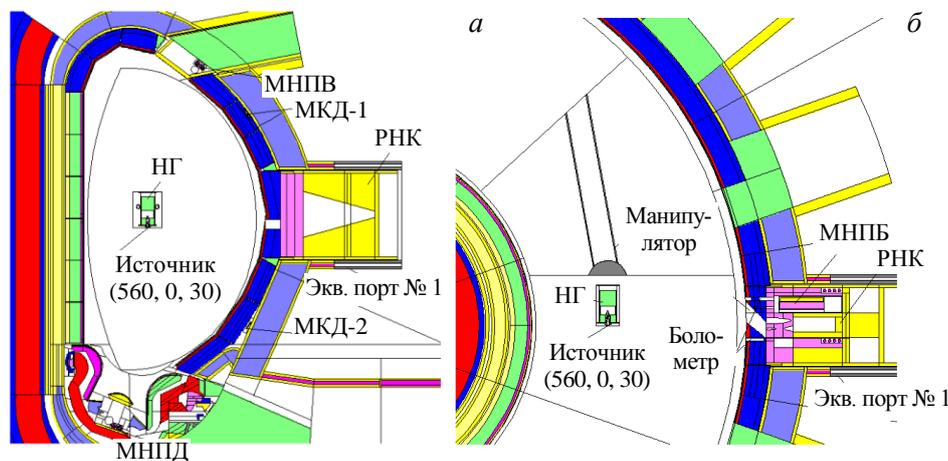


Рис. 3. Вертикальное (а) и горизонтальное (б) сечения 360° модели Alite_CND с нейтронным генератором и манипулятором

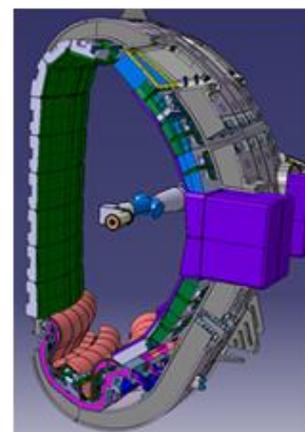


Рис. 4. Сечение 40° модели ИТЭР с нейтронным генератором и манипулятором

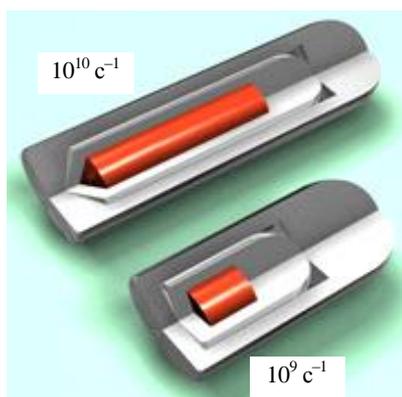


Рис. 5. Нейтронные источники ^{252}Cf производства НИИАР

Радиоизотоп ^{252}Cf , на основе которого изготавливают нейтронные источники, получают искусственным путём на высокопоточных реакторах. Этот изотоп производит НИИАР [11], в каталоге которого от 2004 г. представлены источники с выходом нейтронов 10^9 с^{-1} типа NC252M11.19 и 10^{10} с^{-1} типа NC252M12.210 (рис. 5). Для расчётов принята модель источника интенсивностью 10^9 с^{-1} , близкой к интенсивности предполагаемого генератора DD-нейтронов. Излучающим нейтроны элементом источника является цилиндрическая таблетка окиси калифорния, расположенная в центре капсулы из нержавеющей стали. Расчётная модель источника идентична конструкции, представленной на рис. 5.

ЭМИССИОННЫЕ СВОЙСТВА ИСТОЧНИКОВ

Генератор DT-нейтронов. Эмиссия нейтронов из мишени нейтронного генератора относительно вектора пучка дейтронов следует энергоугловой зависимости, обусловленной различными факторами: наличием импульса ускоренных дейтронов, торможением дейтронов в мишени, отравлением тритиевой мишени дейтронами. В лабораторной системе координат энергия DT-нейтронов зависит от энергии дейтронов и угла вылета. Для энергии дейтронов 200 кэВ диапазон вариации энергии нейтронов в зависи-

мости от угла вылета (кинематический) составляет ~ 2 МэВ, что соответствует максимальной и минимальной энергиям нейтронов $\sim 15,1$ и $\sim 13,1$ МэВ. Торможение дейтронов в материале подложки мишени (Ti) может вызывать некоторое размытие этих значений. Типичная анизотропия выхода нейтронов в диапазоне энергии дейтронов 150—200 кэВ составляет 5—7%.

При задании источника нейтронов в виде энергоугловой гистограммы в точке расположения мишени в расчётной модели генератора использовались рекомендованные данные по энергоугловым зависимостям выхода нейтронов в генераторах DT- и DD-нейтронов при энергии дейтронов 200 кэВ [12, 13]. Угловая зависимость выхода нейтронов считалась линейной и задавалась в виде гистограммы на 10 равных отрезках разбиения косинуса угла вылета в диапазоне $(-1, 1)$ (рис. 6, а). Каждому отрезку этой гистограммы поставлена в соответствие индивидуальная энергия нейтронов источника (рис. 6, б).

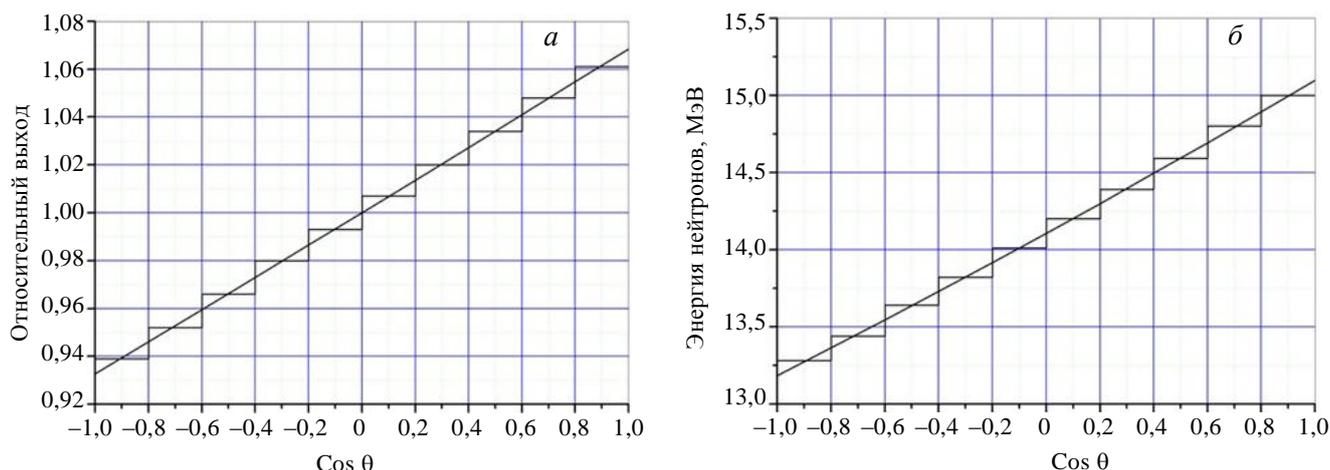


Рис. 6. Энергоугловое распределение выхода DT-нейтронов из мишени НГ: а — относительный выход; б — энергия нейтронов

Энергоугловое распределение выхода нейтронов из модели нейтронного генератора, рассчитанное на границе описанной вокруг модели сферы радиусом 1 м с центром в мишенном узле модели, показано на рис. 7 в виде зависимостей скоростей деления ^{235}U и ^{238}U от косинуса орбитального угла для двух вариантов конфигурации модели: пустой и наполненной материалами. Ось z ориентирована в противоположном направлении по отношению к пучку дейтронов. При отсутствии материалов модель имитирует заданное кинематическое угловое распределение. Материальное наполнение модели резко изменяет индикатрисы скоростей делений. Внутренний объём высоковольтного блока, заполненный минеральным маслом, является эффективным замедлителем и отражателем нейтронов источника. Для ^{235}U это проявляется в многократном увеличении скорости делений, преимущественно в заднем направлении. Для ^{238}U заметно некоторое увеличение скорости делений вперёд за счёт вторичных быстрых нейтронов, размноженных или отражённых конструкцией. В заднем направлении скорость делений резко падает вследствие замедления нейтронов источника ниже порога деления ^{238}U .

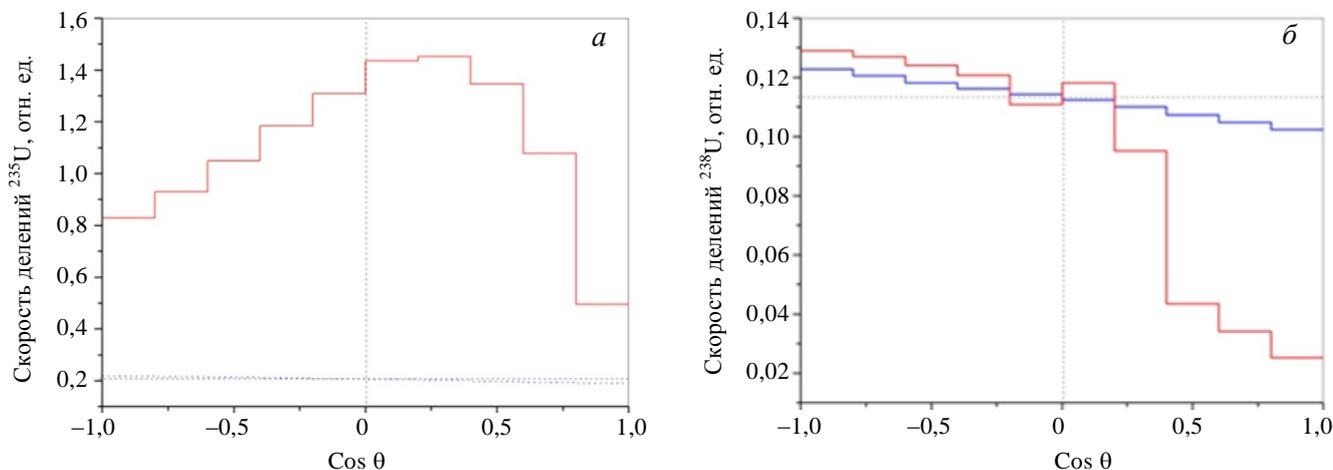


Рис. 7. Индикатрисы скоростей делений ^{235}U (а) и ^{238}U (б) на сфере радиусом 1 м с центром в мишенном узле модели нейтронного генератора НГ-24М: \cdots и — — пустая модель (кинематическое распределение); — — наполненная модель

Генератор DD-нейтронов. При задании источника DD-нейтронов использованы рекомендованные данные по энергоугловой зависимости выхода нейтронов из тонкой мишени в генераторе DD-нейтронов с энергией дейтронов 200 кэВ [13], хорошо согласующиеся с экспериментальными измерениями. В отличие от рассмотренного распределения для DT-нейтронов выход нейтронов на рис. 8 в перпендикулярном направлении к пучку дейтронов почти вдвое меньше выхода вперёд и в 1,5 раза меньше выхода назад. В модели источник нейтронов задавался также в виде энергоугловой гистограммы.

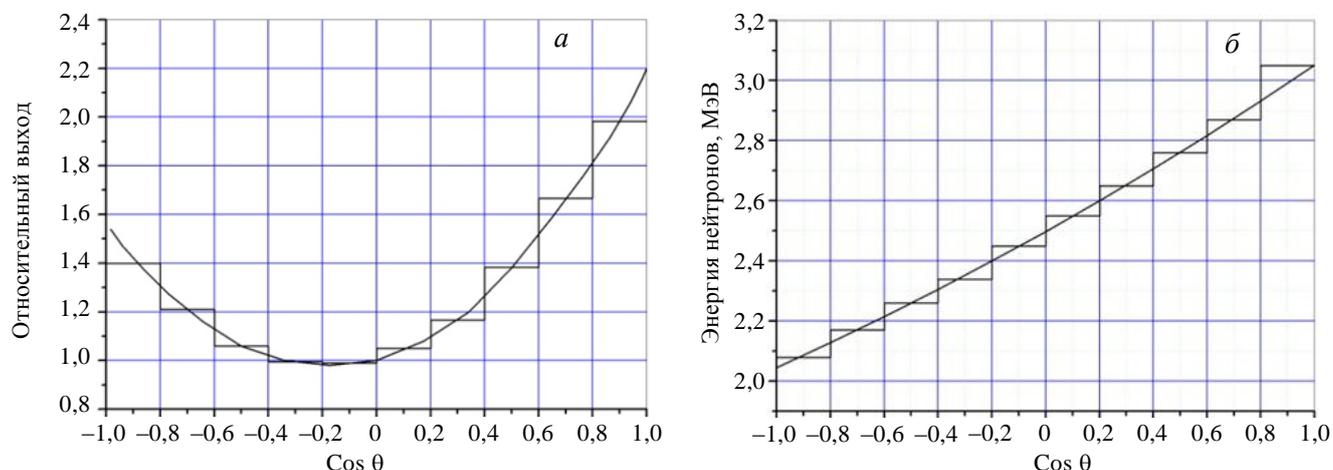


Рис. 8. Энергоугловое распределение выхода DD-нейтронов из мишени НГ: а — относительный выход; б — энергия нейтронов

Индикатрисы скоростей деления ^{235}U и ^{238}U на границе описанной вокруг модели сферы радиусом 1 м с центром в мишенном узле представлены на рис. 9. В пустой модели воспроизводится заданное кинематическое угловое распределение DD-нейтронов. В наполненной модели скорости делений в целом изменяются аналогично варианту генератора DT-нейтронов, однако фоновая скорость делений ^{235}U здесь в 1,5 раза выше. Это объясняется меньшей утечкой DD-нейтронов источника из водородосодержащего объема генератора за счёт их меньшей начальной энергии и соответственно большей вероятностью замедления.

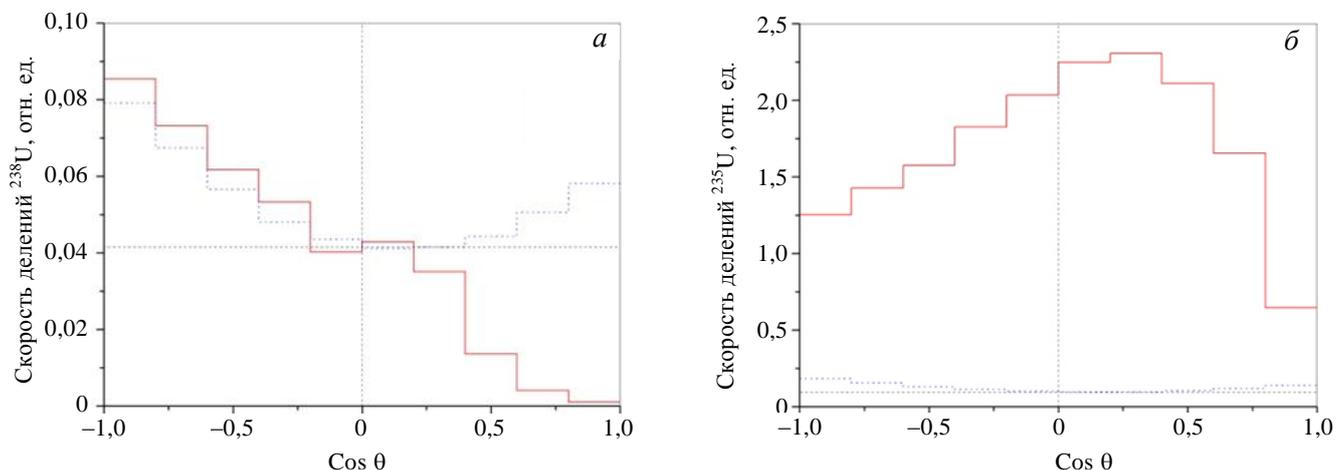


Рис. 9. Индикатрисы скоростей делений ^{238}U (а) и ^{235}U (б) на сфере радиусом 1 м с центром в мишенном узле модели нейтронного генератора НГ-24М: — пустая модель (кинематическое распределение); — — наполненная модель

Радиоизотопный источник ^{252}Cf . Этот источник является альтернативой генератора DD-нейтронов при калибровке мониторов для работы с DD-плазмой. Выход нейтронов при спонтанном делении ^{252}Cf считается изотропным. Энергетический спектр испускаемых нейтронов описывается спектром Ватта

$$f(E) = C \exp(-E/a) \sinh(bE)^{-1/2}, \quad a = 1,025 \text{ МэВ}, \quad b = 2,926 \text{ МэВ}^{-1}.$$

Физическим достоинствам этого источника — изотропии выхода нейтронов, стабильности интенсивности на характерных временах облучения и известной её калибровке сопутствуют очевидные практические недостатки — высокие уровни нейтронного и гамма-излучения, невозможность «выключения» в паузах между измерениями, высокая стоимость и значительное энерговыделение.

При отсутствии материалов угловое распределение скоростей делений ^{235}U и ^{238}U на окружающей источник сфере изотропно (рис. 10). Наличие капсулы источника из нержавеющей стали приводит к увеличению фоновой скорости делений ^{235}U (~10%) в нижней и средней частях сферы, что можно объяснить некоторым смягчением спектра нейтронов в этих направлениях. Для ^{238}U наличие капсулы проявляется в этих направлениях в экранировании быстрых нейтронов источника и соответственно уменьшении скорости делений на ~20% за счёт неупругих взаимодействий в капсуле. В верхней части сферы скорости делений для обоих изотопов спадают на 40—60% вследствие преобладающего экранирования скорости делений толстым слоем нержавеющей стали.

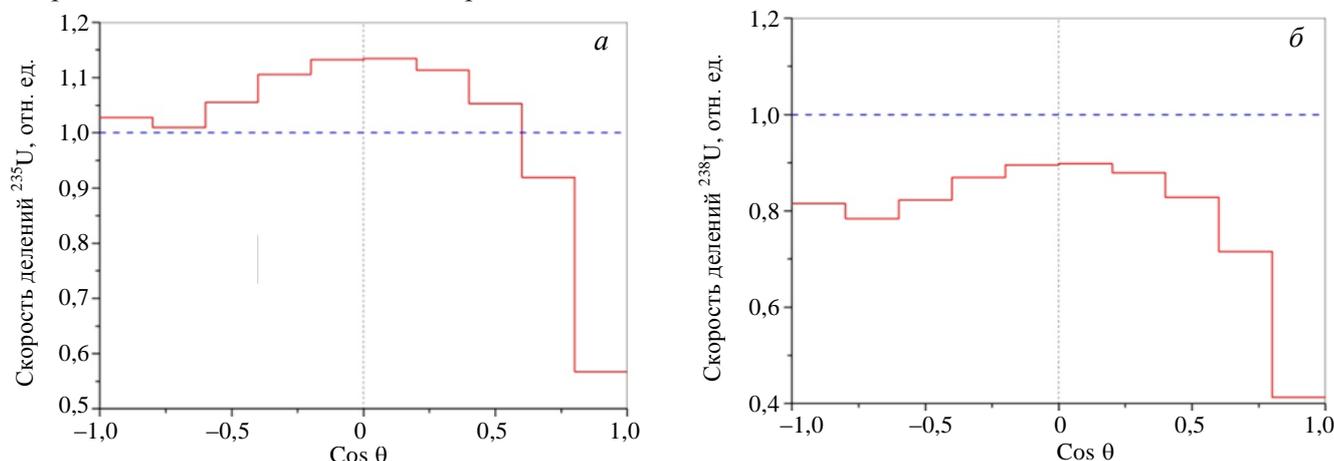


Рис. 10. Индикатрисы скоростей делений ^{235}U (а) и ^{238}U (б) на сфере радиусом 1 м с центром в излучающем объёме источника ^{252}Cf : --- пустая модель; — наполненная модель

АЗИМУТАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ОТКЛИКОВ МОНИТОРОВ НА МОДЕЛИ НЕЙТРОННЫХ ИСТОЧНИКОВ

В связи с рассмотренной анизотропией выхода нейтронов из мишени и корпуса реального нейтронного генератора нейтронов необходимо исследовать и оптимизировать его ориентацию в камере реактора относительно мониторов нейтронного потока с точки зрения реализации наилучшего соответствия идеальным условиям облучения точечным изотропным источником. Результаты расчёта откликов бланкетных мониторов на различные конфигурации DT- и DD-источников нейтронов, расположенных в центральной позиции, приведены в табл. 1. Отклики на модели нейтронных генераторов с пустыми или заполненными материалами внутренних зон нормированы на отклики на соответствующие точечные изотропные источники.

Таблица 1. Отклики бланкетных мониторов на источники DT- и DD-нейтронов с мишенью в центральной позиции, нормированные на отклики на точечный источник

Источник, позиция мишени $X = 560, Y = 0, Z = 30$	Вертикальный НГ, пучок дейтронов вдоль оси $-Z$		Горизонтальный НГ, пучок дейтронов вдоль оси $+X$		Горизонтальный НГ, пучок дейтронов вдоль оси $-Y$	
Монитор	Π^1	M^2	Π	M	Π	M
Источник DT-нейтронов						
МНПБ (4 г $^{235}\text{UO}_2$)	0,993	0,912	1,132	1,218	0,998	0,852
МКД-1	0,937	0,217	1,094	1,126	0,997	0,808
МКД-2	1,135	1,161	1,111	1,157	1,002	0,818
Источник DD-нейтронов						
МНПБ (4 г $^{235}\text{UO}_2$)	0,788	0,644	1,479	1,605	0,770	0,581
МКД-1	0,919	0,130	1,467	1,443	0,778	0,518
МКД-2	1,351	1,415	1,301	1,362	0,767	0,564

¹Пустой НГ.

²НГ с материалами.

При замене точечного изотропного источника моделью нейтронного генератора следует ожидать проявления в откликах мониторов трёх физических различий этих источников: анизотропного вылета нейтронов из мишени, появления дополнительного источника медленных нейтронов в водородосодержащих материалах НГ и экранирования конструкцией НГ потока первичных (термоядерных) нейтронов в реактор и соответственно на мониторы. Наличие этих эффектов подтверждается данными табл. 1. Различия относительных откликов вариантов модели с пустыми зонами НГ (П) обусловлены эффектами кинематической анизотропии выхода нейтронов из мишени генератора. В зависимости от ориентации пучка дейтронов к направлению на монитор они варьируют от ~10% для DT- до ~40% для DD-нейтронов. При наполнении блока нейтронного генератора материальным составом зон (М) появляется дополнительный источник порождённых им медленных нейтронов, вызывающий суммарное (вместе с анизотропией) увеличение откликов на DT-нейтроны на 15—20%. Для DD-нейтронов проявление эффекта дополнительного источника медленных нейтронов маскируется сильной зависимостью откликов от углов вылета нейтронов из источника. Суммарный эффект в этом случае может составлять 40—60%. Наконец, можно отметить эффекты экранировки конструкцией генератора потока первичных нейтронов в направлении мониторов при ориентации пучка дейтронов вдоль отрицательной оси координат $-Y$ и, особенно, для монитора МКД-1 при ориентации пучка вдоль оси $-Z$ (отмечены в таблице жирным шрифтом).

АЗИМУТАЛЬНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКЛИКОВ НА ГЕНЕРАТОР DT-НЕЙТРОНОВ

Так же, как и для точечного изотропного источника, расчёты азимутального распределения откликов бланкетных мониторов на генератор DT-нейтронов проводились вдоль эквивалентного кольца в угловых позициях (точках расположения центра его мишени), соответствующих шести узлам интегрирования азимутальной зависимости по схеме Гаусса. Эквивалентное кольцо источника $R = 560$ см, $Z = 30$ см в данном разделе выбрано по результатам анализа модели ИТЭР, принятой в предыдущих работах [1, 6]. Некоторые результаты для более поздней модифицированной модели ИТЭР, уточняющие абсолютные значения откликов, будут рассмотрены далее. В табл. 2 сравниваются отклики на три модели источника — «пустой» НГ с точечным изотропным источником («источник 1») и два варианта горизонтально расположенного наполненного материалами нейтронного генератора с пучком дейтронов вдоль положительной оси координат $+X$ («источник 2») или по касательной к эквивалентному кругу в направлении к центральной позиции («источник 3»). Значения откликов бланкетных мониторов для трёх типов источ-

Т а б л и ц а 2. Отклики бланкетных мониторов (10^{-30} дел./атом/н.и.) в узлах Гаусса на эквивалентном кольце источника для различных типов источника DT-нейтронов

Источник	Азимутальные узлы Гаусса на эквивалентном кольце, град.					
	5,17	25,9	58,3	94,9	127,3	148,1
МНПБ (4 г $^{235}\text{UO}_2$)						
1	2,77	0,608	0,174	0,102	0,0163	0,00997
2	3,44	0,693	0,211	0,133	0,0175	0,0110
3	3,29	0,766	0,209	0,136	0,0191	0,0112
МНПБ (0,2 г $^{235}\text{UO}_2$)						
3	5,66	0,951	0,249	0,161	0,0246	0,0133
МНПБ (0,02 г $^{235}\text{UO}_2$)						
3	5,93	0,831	0,214	0,136	0,0196	0,0131
МКД-1						
1	2,33	0,983	0,279	0,179	0,00877	0,00469
2	2,66	1,11	0,354	0,189	0,0106	0,00532
3	2,75	1,166	0,383	0,203	0,0163	0,00634
МКД-2						
1	2,07	0,837	0,237	0,128	0,0123	0,0102
2	2,38	0,940	0,286	0,145	0,0141	0,00931
3	2,31	0,978	0,28	0,143	0,0149	0,00964

ников в узловых точках по азимуту даны на рис. 11, а—г вместе с полученными ранее азимутальными распределениями для точечных источников. Средние по азимуту значения откликов, полученные интегрированием по шести узлам, приведены в табл. 3.

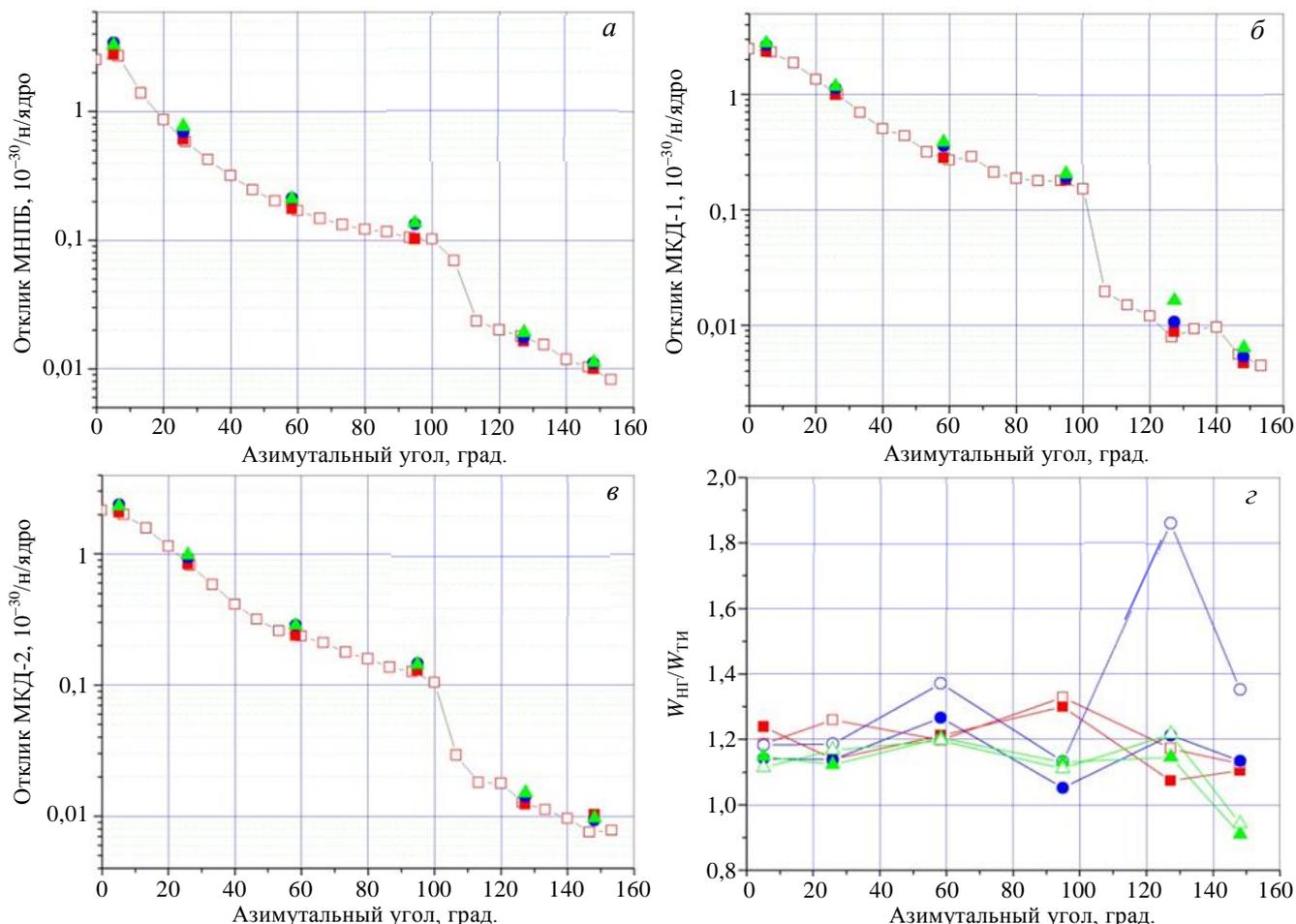


Рис. 11. Сравнение откликов бланкетных мониторов на точечный изотропный источник ДТ-нейтронов и на генератор ДТ-нейтронов в различной ориентации: МНПБ (а), МКД-1 (б), МКД-2 (в), тип ДТ-источника: □, ■ — точечный; ● — НГ X+; ▲ — НГ тангенц., W_{HF}/W_{Ti} (г), мониторы МНПБ, МКД-1, МКД-2, источники: тип 2 (■, ●, ▲), тип 3 (□, ○, △)

Т а б л и ц а 3. Средние по азимуту эквивалентного кольца отклики на генератор ДТ-нейтронов и отклики на эквивалентный кольцевой источник (10⁻³⁰ дел./атом/н.и.)

Отклик	Монитор		
	МНПБ (4 г ²³⁵ UO ₂)	МКД-1	МКД-2
Кольцевой изотропный источник	0,322	0,414	0,340
Средний отклик на точечный изотропный источник по шести узлам	0,346	0,418	0,352
Средний отклик на НГ по шести узлам, тип источника:			
1	0,348	0,397	0,345
2	0,420	0,459	0,395
3	0,421	0,482	0,3967

Из сравнения следует, что для откликов во всех указанных угловых позициях интегрирования, как и для полученных на их основе средних по азимуту откликов, преобладающим эффектом замены идеального источника нейтронным генератором является увеличение откликов на 15—20% за счёт появления дополнительного источника медленных нейтронов в водородосодержащих материалах нейтронного генератора. При этом ориентация пучка дейтронов нейтронного генератора не оказывает существенного влияния на величину эффекта.

Этот вывод иллюстрируется рис. 11, г, где по данным табл. 2 в зависимости от азимутального угла даны отношения откликов бланкетных мониторов для типов 2 и 3 источника (нейтронный генератор) на отклики для точечного изотропного источника.

За исключением отдельного выброса, по-видимому, обусловленного статистической погрешностью расчёта малого эффекта, величины поправок к интегралу от азимутального распределения при

переходе от нейтронного генератора к идеальному источнику приблизительно равны отношениям локальных откликов вблизи центральной позиции ($\varphi = 0$) и составляют $\sim 20\%$ для монитора МНПБ и $\sim 15\%$ для микрокамер деления.

АЗИМУТАЛЬНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКЛИКОВ НА ГЕНЕРАТОР DD-НЕЙТРОНОВ

Детальный нейтронно-физический анализ откликов на круговые источники нейтронов в поперечном сечении реактора для DD-плазмы не проводился ввиду большой трудоёмкости расчёта двумерной матрицы откликов и качественного подбора пространственных распределений откликов для различных спектров нейтронов источника. Поэтому в оценках для источников DD-нейтронов использовалось такое же положение эквивалентного кругового источника, как для рассчитанной ранее матрицы с источниками DT-нейтронов. Азимутальное распределение откликов бланкетных мониторов на генератор DD-нейтронов рассчитывалось с использованием расчётной модели для DT-генератора и в тех же точках его расположения. Результаты расчётов с тремя моделями источника табл. 2 приведены в табл. 4.

Таблица 4. Отклики бланкетных мониторов (10^{-30} дел./атом/н.и.) в узлах Гаусса на эквивалентном кольце источника для различных типов источника DD-нейтронов

Тип источника	Азимутальные узлы Гаусса на эквивалентном кольце, град.					
	5,17	25,9	58,3	94,9	127,3	148,1
МНПБ (4 г $^{235}\text{UO}_2$)						
1	1,77	0,430	0,131	0,0795	0,0157	0,0920
2	2,92	0,648	0,169	0,116	0,0162	0,0101
3	1,81	0,648	0,191	0,111	0,0184	0,0122
МКД-1						
1	0,783	0,381	0,137	0,0557	0,00958	0,00320
2	1,12	0,513	0,153	0,106	0,00555	0,00532
3	0,754	0,513	0,199	0,0908	0,00749	0,00542
МКД-2						
1	7,69	0,360	0,110	0,0538	0,0122	0,00704
2	1,02	0,536	0,162	0,0814	0,0138	0,00761
3	7,45	0,536	0,181	0,0784	0,0121	0,00907

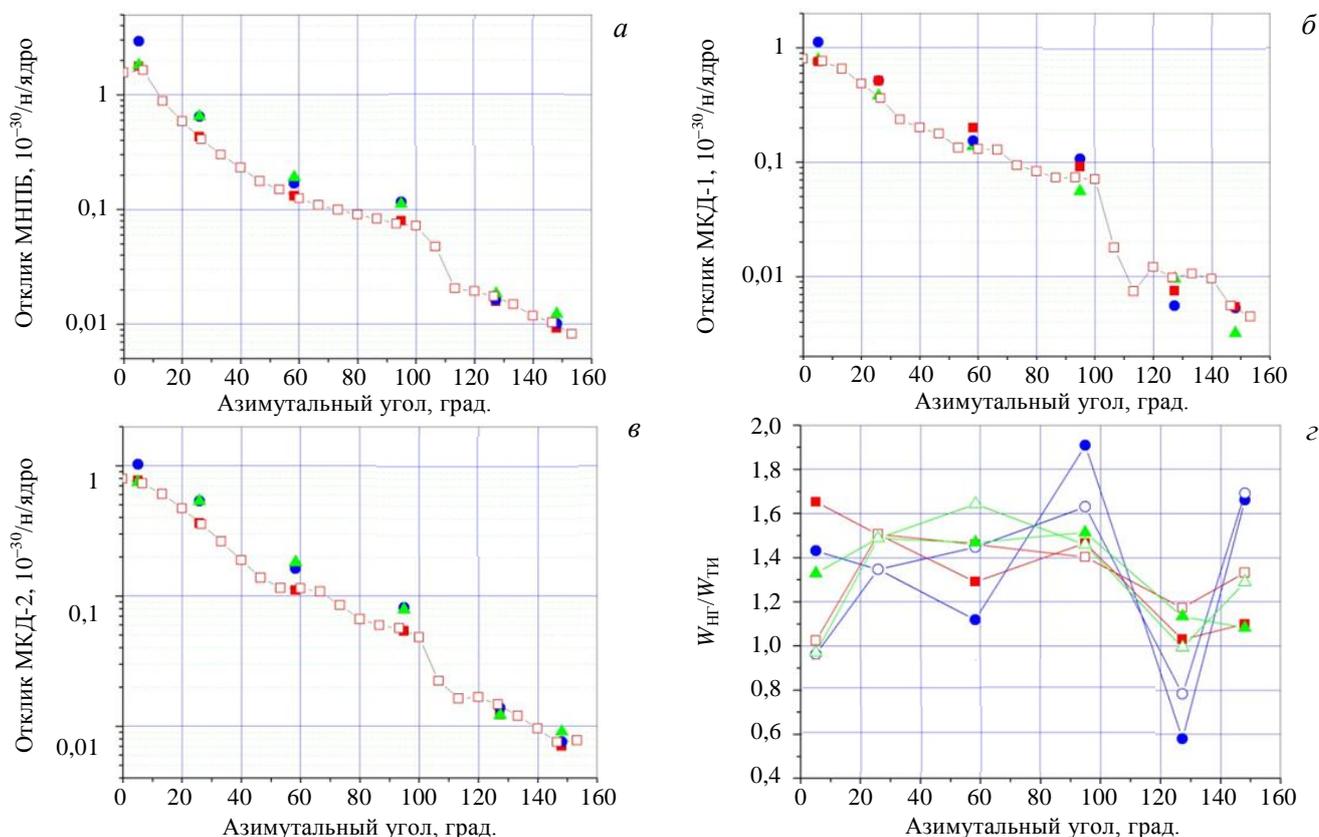


Рис. 12. Сравнение откликов бланкетных мониторов на точечный изотропный источник DD-нейтронов и на DD-нейтронный генератор в различной ориентации: МНПБ (а); МКД-1 (б); МКД-2 (в); тип DT-источника: \square, \blacksquare — точечный; \bullet — НГ X+; \blacktriangle — НГ тангенц., $W_{\text{нп}}/W_{\text{ти}}$ (г), мониторы МНПБ, МКД-1, МКД-2, источники: тип 2 ($\blacksquare, \blacktriangle, \bullet$), тип 3 ($\square, \triangle, \circ$)

Значения откликов бланкетных мониторов в узловых точках сравниваются на рис. 12 с полученными ранее азимутальными распределениями для точечных источников. Средние по азимуту значения откликов, полученные интегрированием азимутальных зависимостей по шести узлам, приведены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5. Средние по азимуту эквивалентного кольца отклики на генератор DD-нейтронов и отклики на эквивалентный кольцевой источник (10^{-30} дел./атом/н.и.)

Отклик	Монитор		
	МНПБ (4 г $^{235}\text{UO}_2$)	МКД-1	МКД-2
Кольцевой изотропный источник	0,199	0,152	0,139
Средний отклик на точечный изотропный источник по шести узлам	0,228	0,155	0,146
Средний отклик на НГ по шести узлам, тип источника:			
1	0,234	0,151	0,142
2	0,364	0,203	0,201
3	0,287	0,185	0,184

По данным табл. 4 на рис. 12, z построены зависимости от азимутального угла отношения откликов бланкетных мониторов для источников типа 2 и 3 (нейтронный генератор) к откликам для точечного изотропного источника. Из приведённых сравнений следует, что аналогично выводам предыдущего раздела суммарным эффектом замены точечного источника DD-нейтронов генератором DD-нейтронов является увеличение откликов на 30—60% за счёт появления дополнительного источника медленных нейтронов в водородосодержащих материалах нейтронного генератора и сильной анизотропии выхода нейтронов из мишени. Более рациональной выглядит тангенциальная ориентация блока нейтронного генератора в горизонтальной плоскости, для которой в первой узловой точке, в которой отклик максимален, отклики на генератор и точечный изотропный источник практически совпадают для всех трёх мониторов, а в остальных узлах они ближе к идеальной кривой, чем для источника второго типа.

Величины поправок при переходе от среднего по азимуту отклика для нейтронного генератора к отклику для изотропного точечного источника в этом случае составляют 1,22, 1,22 и 1,29 соответственно для мониторов МНПБ, МКД-1 и МКД-2.

АЗИМУТАЛЬНЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОТКЛИКОВ НА ИСТОЧНИК ^{252}Cf

Азимутальное распределение откликов бланкетных мониторов на нейтроны деления источника ^{252}Cf рассчитывалось аналогично в тех же точках, что и для ДТ-генератора. Результаты расчётов приведены в табл. 6 для двух типов источника — точечного изотропного (1) и модели реального изотропного источника в капсуле (2), прототипом которого был источник НС252М12 производства НИИАР.

Т а б л и ц а 6. Отклики бланкетных мониторов (10^{-30} дел./атом/н.и.) в узлах Гаусса на эквивалентном кольце источника для различных типов ^{252}Cf -источника

Тип источника	Азимутальные углы в узлах Гаусса на эквивалентном кольце, град.					
	5,17	25,9	58,3	94,9	127,3	148,1
	МНПБ (4 г $^{235}\text{UO}_2$)					
1	1,58	0,358	0,114	0,0702	0,0117	0,0103
2	1,71	0,400	0,118	0,0773	0,0151	0,00978
	МКД-1					
1	0,661	0,275	0,0729	0,0503	0,0982	0,0490
2	0,538	0,243	0,0962	0,0682	0,0924	0,0582
	МКД-2					
1	0,604	0,291	0,0982	0,0533	0,0135	0,00681
2	0,548	0,313	0,105	0,0470	0,0125	0,00810

Значения откликов бланкетных мониторов в узловых точках сравниваются на рис. 13 с азимутальными распределениями для точечных источников. Средние по азимуту значения откликов, полученные интегрированием азимутальных зависимостей по шести узлам, приведены в табл. 7.

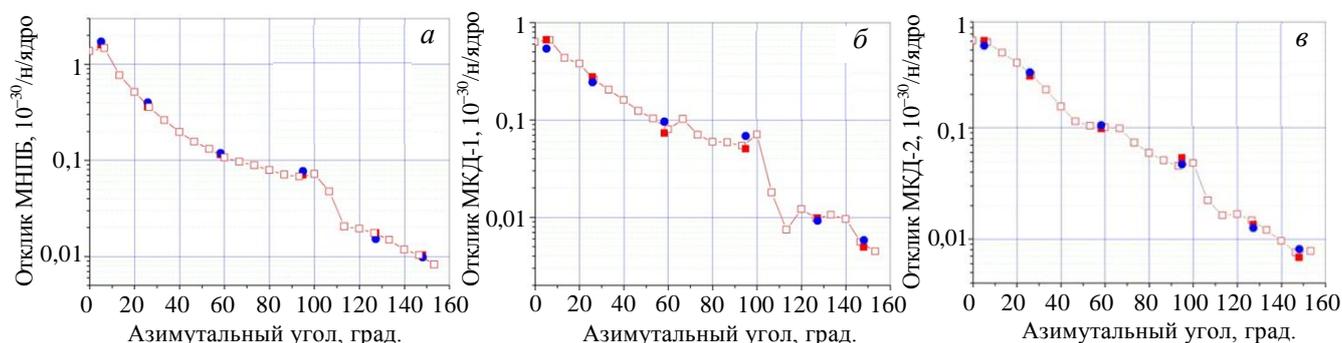


Рис. 13. Сравнение откликов бланкетных мониторов на точечный изотропный источник ^{252}Cf и на источник ^{252}Cf в капсуле: МНПБ (а); МКД-1 (б); МКД-2 (в); \square, \blacksquare — точечный; \bullet — в капсуле

Т а б л и ц а 7. Средние по азимуту эквивалентного кольца отклики на источник ^{252}Cf -нейтронов и отклики на эквивалентный кольцевой источник (10^{-30} дел./атом/н.и.)

Отклик	Монитор		
	МНПБ	МКД-1	МКД-2
Кольцевой изотропный источник	0,174	0,116	0,115
Средний отклик на точечный изотропный источник по шести узлам	0,202	0,119	0,122
Средний отклик по шести узлам, тип источника:			
1	0,205	0,113	0,117
2	0,223	0,105	0,118

Согласие в пределах нескольких процентов средних по азимуту значений откликов всех мониторов, полученных в серии независимых расчётов с идеальным точечным источником (средние строки в табл. 7), свидетельствует об удовлетворительной точности выбранной процедуры интегрирования по шести узлам. Средние значения откликов также удовлетворительно согласуются с откликами на кольцевой источник мониторов МКД-1 и МКД-2, которые они должны воспроизводить. Для монитора МНПБ средние по азимуту отклики выше отклика на кольцевой источник на ~16%. Возможно, это обусловлено погрешностью интерполяции полиномами распределения, имеющего промежуточный максимум вблизи угла 5° .

В варианте с источником ^{252}Cf в капсуле отклик МНПБ по сравнению с идеальным источником завышается на ~9%, а для мониторов МКД-1 и МКД-2 — занижается соответственно на 12 и 3%.

НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ДИАГНОСТИК

В табл. 8 представлены значения откликов детекторов мониторов на штатные объёмные источники DT- и DD-нейтронов нейтронных диагностик, модели которых претерпели существенные изменения после этапов, описанных в работах [1, 6]. Это касается монитора нейтронного потока в диверторе и монитора нейтронного потока с бериллиевым замедлителем в экваториальном порту. Относительная погрешность откликов в одно стандартное отклонение не превышает 1%. Наибольшее изменение (увеличение в ~2 раза) в сравнении с ранее выполненными расчётами получено для отклика МНПД в ИК с ^{238}U , что связано с изменением конструкции детекторного блока и его положения на диверторной кассете. Для остальных детекторов отличие не превысило 25%.

Т а б л и ц а 8. Отклики детекторов бланкетных мониторов (10^{-30} дел./атом/н.и.) на штатный объёмный источник DT- и DD-нейтронов, нормированные на один нейтрон источника в реакторе

Источник		Монитор						
		МНПД		МНПВ		МКД-1	МКД-2	МНПБ (2 г U5)
		U5	U8	U5	U8	U5	U5	
DT-модель	«новая»	10,4	0,0201	6,62	0,0169	0,432	0,304	0,302
	«старая»	12,8	0,00941	—	—	0,402	0,296	0,325
DD-модель		8,93	0,00742	5,39	0,00504	0,166	0,126	0,158

Поскольку модели нейтронных диагностик изменились, были повторены расчёты с источником DT-нейтронов, уточняющие положение эквивалентных колец для монитора в диверторе и бланкетных мониторов. Выделенные в табл. 9 значения показывают новые положения эквивалентного кольца для каждого монитора.

Т а б л и ц а 9. Отклики мониторов $^{235}\text{U}(n, f)$ на кольцевые DT-источники, нормированные на отклик на штатный объёмный источник ИТЭР

Монитор	Z/R, см	560	600	640	680	720
МНПД	-50	1,21	1,16	1,09	1,06	1,02
	-10	1,05	1,09	1,07	0,99	0,986
	30	0,98	1,04	0,98	0,966	0,976
	60	0,973	0,996	0,966	0,959	0,959
МНПБ	-50	0,880	0,892	0,888	0,880	0,807
	-10	0,99	1,03	1,07	1,13	1,18
	30	1,06	1,17	1,20	1,33	1,50
	60	1,17	1,21	1,34	1,51	1,75
МКД-1	-50	0,811	0,765	0,698	0,631	0,527
	-10	0,914	0,887	0,793	0,698	0,581
	30	1,0	0,959	0,883	0,806	0,680
	60	1,07	1,09	1,04	0,919	0,752
МКД-2	-50	1,31	1,41	1,49	1,44	1,24
	-10	1,26	1,29	1,25	1,13	0,947
	30	1,15	1,11	1,05	0,932	0,771
	60	1,08	0,990	0,948	0,818	0,687

В табл. 10 приведены рассчитанные абсолютные величины откликов диверторного и бланкетных мониторов на изотропный точечный источник в центральной позиции ($\varphi = 0^\circ$, над монитором) и относительные значения откликов в пяти положениях на эквивалентном кольце радиусом 680 см на высоте -10 см, нормированные на соответствующий отклик монитора в центральной позиции. Как следует из табл. 9, отклик на этот кольцевой источник монитора МНПД с ^{235}U практически совпадает с откликом на штатный объёмный источник ИТЭР.

Т а б л и ц а 10. Отклики мониторов W_m^0 (10^{-30} дел./атом/н.и.) на точечный изотропный источник DT-нейтронов в центральной позиции и в зависимости от азимутального положения источника на эквивалентном кольце

Параметр	Монитор						
	МНПД		МНПБ		МКД-1	МКД-2	МНПБ
	U5	U8	U5	U8	U5	U5	(2 г U5)
W_m^0	Центральная позиция						
	37,6	0,350	17,9	0,04	1,88	3,59	3,49
φ , град	Эквивалентное кольцо						
0	1	1	1	1	1	1	1
20	0,777	0,45	0,808	0,723	0,457	0,227	0,195
90	0,123	0,0044	0,229	0,225	0,0827	0,0297	0,0231
120	0,056	0,00012	0,063	0,011	0,0081	0,0054	0,0108
160	0,032	0,00003	0,031	0,0026	0,0024	0,0023	0,0017

Отклик в центральной позиции максимален по величине и является определяющим в методике вычисления отклика на кольцевой источник с помощью коэффициента неравномерности азимутального распределения [1]. Для этой позиции источника в табл. 11 приведены результаты расчёта откликов на генератор DT-нейтронов при различных направлениях пучка дейтронов. Для МНПД, как и в предыдущем анализе для «старой» модели наиболее предпочтительным оказывается горизонтальное положение НГ при ориентации пучка дейтронов по касательной к контуру круга (-Y). При этом отклик в детекторе ^{235}U отличается от отклика на точечный изотропный источник на ~3%.

Таблица 11. Отклики мониторов (10^{-30} дел./атом/н.и.) на DT-нейтроны НГ с мишенью в центральной позиции для различных направлений пучка дейтронов

Направление пучка D к оси координат	МНПД		МНПБ		МКД-1	МКД-2	МНПБ (2 г U5)
	U5	U8	U5	U8	U5	U5	
-X	44,4	0,399	20,0	0,0548	0,165	1,12	0,625
+X	21,6	0,118	12,7	0,0265	2,17	4,18	4,37
-Y	38,9	0,395	18,7	0,0408	1,95	3,24	2,28
+Y	36,3	0,248	10,9	0,0149	1,66	3,14	3,82
-Z	44,4	0,425	6,22	0,00263	0,272	4,38	1,47

ВЫВОДЫ

При замене точечного изотропного источника моделью нейтронного генератора отклики мониторов изменяются вследствие физических отличий генератора от идеального источника: анизотропии вылета нейтронов из мишени, дополнительного источника медленных нейтронов в водородосодержащих материалах НГ и экранирования конструкцией НГ потока первичных (термоядерных) нейтронов на мониторы. Эффекты анизотропии выхода нейтронов в генераторах в зависимости от ориентации пучка дейтронов варьируют от ~10% для DT- до ~40% для DD-нейтронов. Дополнительный источник медленных нейтронов в материалах генератора вызывает суммарное (с анизотропией) увеличение откликов для DT-нейтронов на 15—20%. Для DD-нейтронов проявление эффекта дополнительного источника медленных нейтронов маскируется сильной зависимостью откликов от углов вылета нейтронов из источника, и суммарный эффект может составлять 40—60%.

Расчёты моделей реактора с различной ориентацией генератора DT-нейтронов показали, что наиболее целесообразным для целей калибровки является горизонтальное расположение генератора с ориентацией пучка дейтронов по касательной к эквивалентному кругу в направлении центральной позиции (азимутальный угол $\varphi = 0$). Поправки в величинах средних по азимуту значений откликов для перехода от нейтронного генератора к точечному изотропному источнику в этом случае составляют ~15% для монитора нейтронного потока и ~20% для микрокамер деления.

Вследствие большой анизотропии выхода нейтронов из нейтронного генератора калибровка бланкетных мониторов с источником DD-нейтронов недостаточно надёжна, поскольку она требует учёта больших координатно-зависимых поправок к измеренным откликам для перехода к идеальному точечному источнику. Более простой и надёжной представляется перенормировка калибровки с источником DT-нейтронов.

REFERENCES

1. **Borisov A.A., Deryabina N.A., Markovskij D.V.** Calibration of ITER instant power neutron monitors. Statement of a problem and neutronics analysis of reactor model with point sources of 14-MeV neutrons. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2015, vol. 38, issue 3, pp. 31—48 (in Russian).
2. **Briesmeister J.F.** MCNP-4A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4A. LA-12625-M. Los Alamos National Laboratory, 1993.
3. **Aldama D.L., Trkov A., FENDL-2.1.** Evaluated Nuclear Data Library for Fusion Applications, INDC(NDS)-467. — Vienna: IAEA, 2004.
4. **Loughlin M.** Alite.003, ITER Internal Report ITER_D_2LY78N, 08/28/2008.
5. **System** Design Description document (DDD). Divertor Neutron Flux Monitor, DDD-PBS 55.BC. ITER Internal Report ITER_D_47LJLH v2.0, 22/06/2011.
6. **Borisov A.A., Deryabina N.A., Markovskij D.V.** Calibration of ITER instant power neutron monitors. Responses of blanket monitors to point and ring sources of DT-, DD- и Cf-neutrons. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2015, vol. 38, issue 4, pp. 79—95 (in Russian).
7. **System** Design Description Document (DDD). Neutron Flux Monitor System in Equatorial Port #7 (Occluded), DDD-PBS 55.B4 vol. 1. ITER Internal Report ITER_D_3LTSG4, 21/07/2010.
8. **System** Design Description Document (DDD). Diagnostic — Micro Fission Chambers, DDD-PBS 55.B3 v2.2. ITER Internal Report ITER_D_3T46BH, 04/10/2010.
9. **System** Design Description Document (DDD). Diagnostic neutron activation system, DDD-PBS 55.B8. ITER Internal Report ITER_D_3UYYPF v2.1, 01/11/2010.
10. **Dukhov N.L.** All-Russian Research Institute of Automatics (VNIIA), a SC «Rosatom» Company, www.vniia.ru.
11. **Joint Stock** Company «State Scientific Center Research Institute of Atomic Reactors», Dimitrovgrad, RF, Rosatom State Nuclear Energy Corporation, www.niar.ru.
12. **Csikaj J.** — In: Proc. of the IAEA Consultants. Meeting on Neutron Source Properties. Debrecen, March 1980, p. 265.
13. **Manual** for troubleshooting and upgrading of neutron generators. — IAEA-TECDOC-913, 1996, pp. 11—19.

AUTHORS

Borisov A.A. NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia;

Borisov_AA@nrcki.ru

Deryabina N.A. NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia

Markovskij D.V. NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia;

markd@nfi.kiae.ru

Received 15 January 2016

Problems of Atomic Science and Technology

Ser. Thermonuclear Fusion, 2016, vol. 39, issue 2, pp. 44—57.