

Ю. Г. Фоков, К. К. Рутковская

*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны
Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

**ОСНОВНЫЕ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ПОДКРИТИЧЕСКОЙ СБОРКИ «ЯЛИНА-БУСТЕР»
ПРИ СНИЖЕНИИ ОБОГАЩЕНИЯ ТОПЛИВА В БЫСТРОЙ ЗОНЕ**

(Представлено академиком А. А. Михалевичем)

В сообщении приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований нейтронно-физических характеристик подкритических систем, управляемых ускорителями на примере сборки «Ялина-Бустер». Подкритическая сборка «Ялина-Бустер» нулевой мощности с быстро-тепловым спектром является моделью подкритических ядерно-физических систем, управляемых внешними источниками нейтронов (Accelerator Driven Systems – ADS). В качестве ускорителя заряженных ионов водорода используется генератор нейтронов НГ-12-1. Конструкция сборки позволяет изменять материальный состав активной зоны и исследуемых образцов радионуклидов (некоторых продуктов деления и минор-актинидов) с большим периодом полураспада, расположенных в экспериментальных каналах для изучения влияния потока нейтронов в тепловой и быстрой областях спектра нейтронов. Цель исследований заключалась в поисках возможности максимального сохранения основных нейтронно-физических характеристик сборки при последовательном снижении обогащения уранового топлива в быстрой зоне. Основными критериями оценки изменения нейтронно-физических характеристик при таком переходе являлись уровни подкритичности, пространственные распределения плотности потока нейтронов, зависимость плотности потока нейтронов от времени для внешнего импульсного источника нейтронов при различной длительности ионного импульса и т. п.

Ключевые слова: подкритическая система, нейтронно-физические характеристики, активная зона, кинетические характеристики, эффективный коэффициент размножения нейтронов

Yury G. Fokov, Chrystsina K. Routkovskaia

*Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus*

**MAIN NEUTRONICS OF THE SUBCRITICAL ASSEMBLY “YALINA-BOOSTER”
WHEN DECREASING THE FUEL ENRICHMENT IN THE FAST ZONE**

(Communicated by Academician A. A. Mikhalevich)

The article presents results of analytical and experimental study of neutronics of the accelerator driven subcritical systems by the “Yalina-Booster” example. Zero power subcritical assembly “Yalina-Booster” with fast and thermal spectrum represents a model of subcritical nuclear system driven by external neutron source (Accelerator Driven Systems – ADS). Accelerator of the hydrogen ions (the neutron generator NG-12-1) is used as an external neutron source. The assembly design allows to vary the material content of the core and long half-life radionuclide samples (long lived minor actinides and some fission products) placed in the experimental channels aimed to study the effect of neutron flux density in thermal and fast neutron energy ranges. The objective of the research was to search the ways of keeping the main neutronics at the appropriate level by gradual reducing of nuclear fuel enrichment in the fast zone. Principal estimating criteria of the neutronics variation by such fuel conversion were: subcriticality levels, spatial distributions of neutron flux density, time behavior of neutron flux density for pulsed mode of the external neutron source operation in terms of different ion pulses durations etc.

Keywords: subcritical system, neutronics, core, kinetic parameters, effective multiplication factor

Введение. Подкритическая сборка «Ялина-Бустер» [1–3] нулевой мощности является моделью подкритических ядерно-физических систем, управляемых внешними источниками нейтронов (Accelerator Driven Systems – ADS), и предназначена для изучения основных характеристик ADS с быстрым и тепловым спектрами нейтронов.

Цель исследований заключалась в поисках возможности максимального сохранения основных нейтронно-физических характеристик сборки при последовательном снижении обогащения уранового топлива в быстрой зоне подкритической сборки «Ялина-Бустер».

Основными критериями оценки изменений нейтронно-физических характеристик при таком переходе являлись уровни подкритичности, пространственные распределения плотности потока нейтронов, зависимость плотности потока нейтронов от времени для внешнего импульсного источника нейтронов при различной длительности ионного импульса и т. п.

Основные элементы и узлы. Подкритическая сборка «Яліна-Бустер» состоит из свинцовой мишени, активной зоны, промежуточной зоны, радиального и аксиального отражателей, а также биологической защиты (рис. 1).

Сборка ориентирована горизонтально. Мишень расположена в центральной полости сборки. Она состоит из 12 свинцовых блоков размером $78 \times 78 \times 53,75$ мм каждый. В тех случаях, когда в эксперименте используются [D, D] или [D, T] источники нейтронов, часть полости занимает ионопровод с нейтронно-производящей мишенью, а оставшуюся часть – свинец.

Активная зона сборки состоит из быстрой и тепловой зон. Быстрая зона состоит из свинцовых топливных кассет и подразделяется на внутреннюю и внешнюю зоны, различающиеся количеством твэлов в топливных кассетах. В первой конфигурации быстрая зона была загружена топливом $U_{мет}$ 90 %-ного и UO_2 36 %-ного обогащения по ^{235}U . Во второй конфигурации вся быстрая зона загружалась UO_2 36 %-ного обогащения, в третьей конфигурации быстрая зона загружалась UO_2 21 %-ного обогащения.

Тепловая зона сборки состоит из 108 полиэтиленовых топливных кассет (в каждой кассете 16 топливных каналов) и находится на периферии активной зоны. Промежуточная зона расположена на границе быстрой и тепловой зон и предназначена для обеспечения односторонней нейтронной связи между этими зонами. Она состоит из одного ряда стержней с металлическим ураном (со стороны быстрой зоны) и одного ряда стержней с карбидом бора (со стороны тепловой зоны).

Боковая поверхность активной зоны окружена графитовым отражателем и снаружи обшита слоем органического стекла. По торцам сборки расположены блоки борированного полиэтилена, выполняющие роль биологической защиты. В сборке имеется 6 измерительных и 11 экспериментальных каналов. Все вычисления нейтронно-физических характеристик проводились с использованием кода MCNP [4].

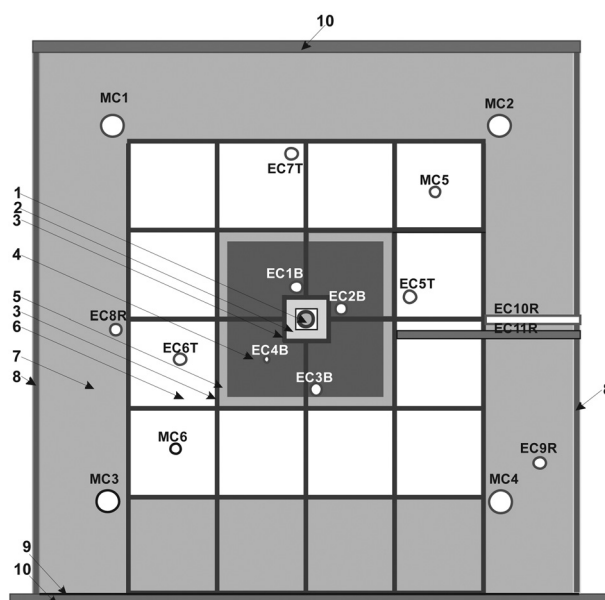


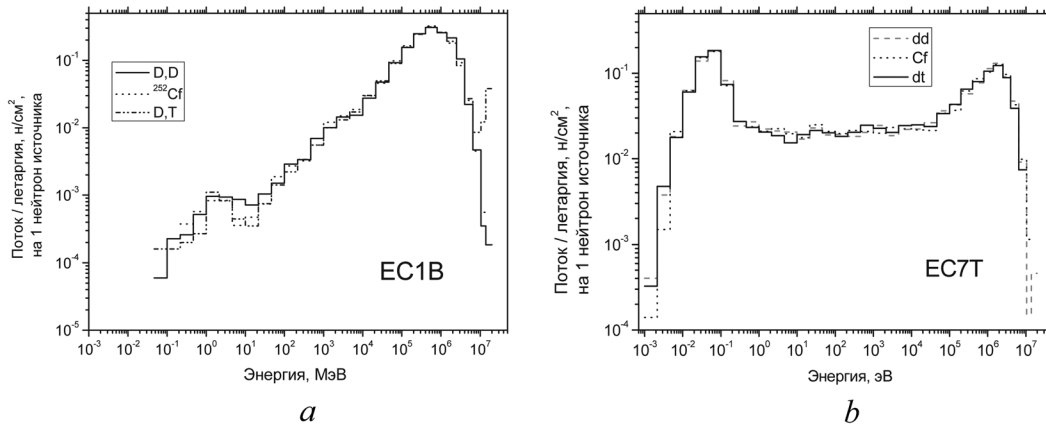
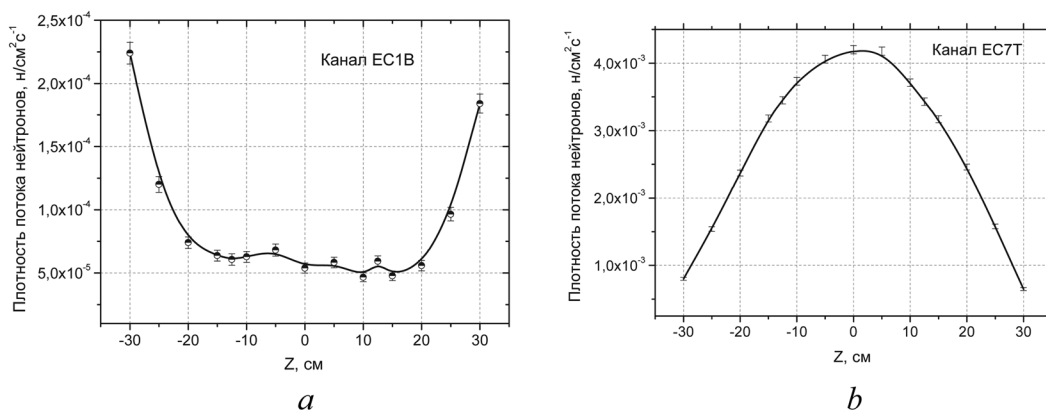
Рис. 1. Поперечное сечение бустерной подкритической сборки: 1 – центральная полость с ионопроводом; 2 – внутренняя быстрая зона; 3 – стальной каркас; 4 – внешняя быстрая зона; 5 – промежуточная зона; 6 – тепловая зона; 7 – графитовый отражатель; 8 – органическое стекло; 9 – слой кадмия; 10 – верхняя и нижняя опорные плиты

Fig. 1. Cross section of the booster subcritical assembly: 1 – central cavity with ion conductor; 2 – inner fast zone; 3 – steel frame; 4 – outer fast zone; 5 – intermediate zone; 6 – thermal zone; 7 – graphite reflector; 8 – organic glass; 9 – cadmium layer; 10 – upper and lower base plates

Основные кинетические параметры для первой конфигурации:Эффективный коэффициент размножения: $k_{\text{эфф}} = 0,97943 \pm 0,00024$;Эффективная доля запаздывающих нейтронов: $\beta_{\text{эфф}} = 0,00738$;Коэффициент размножения с источником ($k_{\text{ист}}$) и коэффициент умножения (M) для внешних источников нейтронов различной интенсивности и спектра (табл. 1).Таблица 1. Коэффициент размножения нейтронов с учетом внешнего источника ($k_{\text{ист}}$) и коэффициент умножения (M)Table 1. Source neutron multiplication factor (k_{src}) and multiplication coefficient (M)

Внешний источник нейтронов External neutron source	Коэффициент Coefficient	
	$k_{\text{ист}}$	M
^{252}Cf	0,99048	105,0
DD	0,99075	108,1
DT	0,99407	167,7

Расчеты показали, что в данной сборке можно реализовать как очень жесткий спектр нейтронов (канал EC1B быстрой зоны, рис. 2, *a*), так и типично тепловой (канал EC7T тепловой зоны, рис. 2, *b*).

Рис. 2. Спектры нейтронов в экспериментальных каналах сборки для [D, T], [D, D], ^{252}Cf источников нейтронов: *a* – в экспериментальном канале EC1B, *b* – в EC7TFig. 2. Neutron spectra in the experimental channels of the assembly for [D, T], [D, D], ^{252}Cf neutron sources: *a* – in the experimental channel EC1B, *b* – in EC7TРис. 3. Аксиальное распределение плотности потока нейтронов в экспериментальных каналах: *a* – EC1B (быстрая зона) и *b* – EC7T (тепловая зона) (БОУ-1)Fig. 3. Axial distribution of the neutron flux density in the experimental channels: *a* – EC1B (fast zone) and *b* – EC7T (thermal zone) HEU

Пространственные распределения плотности потока нейтронов в экспериментальных каналах быстрой и тепловой зон представлены на рис. 3.

Эффективный коэффициент размножения измерялся методом обратного умножения и методом импульсного источника нейтронов (Pulse Neutron Source). Результаты измерений, выполненных в ходе загрузки быстрой зоны, приведены на рис. 4.

Аксиальное распределение плотности потока нейтронов определялось по скоростям реакций $^{235}\text{U}(n, f)$, $^{238}\text{U}(n, f)$, измеренных камерами деления КНТ-5, КНТ-8 в экспериментальных каналах активной зоны. Плотность потока нейтронов в активной зоне при использовании [D, T] источника нейтронов составляла $\sim 10^9$ нейтр/см 2 ·с. Результаты измерений в экспериментальных каналах ЕС1В, ЕС5Т с использованием камеры деления КНТ-5 приведены на рис. 5.

Основные кинетические параметры для второй конфигурации. Было оценено влияние замены твэлов с металлическим ураном 90 %-ного обогащения в центре быстрой зоны (132 твэла) на твэлы с двуокисью урана 36 %-ного обогащения на размножающие свойства сборки. Значения $k_{\text{эфф}}$ в ходе загрузки топлива в активную зону для второй конфигурации сравниваются на рис. 6 и в табл. 2 с результатами для первой конфигурации.

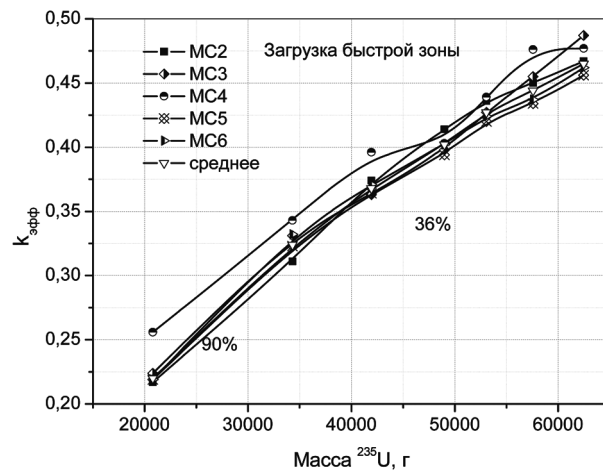


Рис. 4. Зависимость экспериментально измеренного методом обратного умножения значения $k_{\text{эфф}}$ от массы уранового топлива в ходе загрузки быстрой зоны

Fig. 4. Dependence of the k_{eff} value measured by reciprocal counting method on the mass of uranium fuel when loading the fast zone

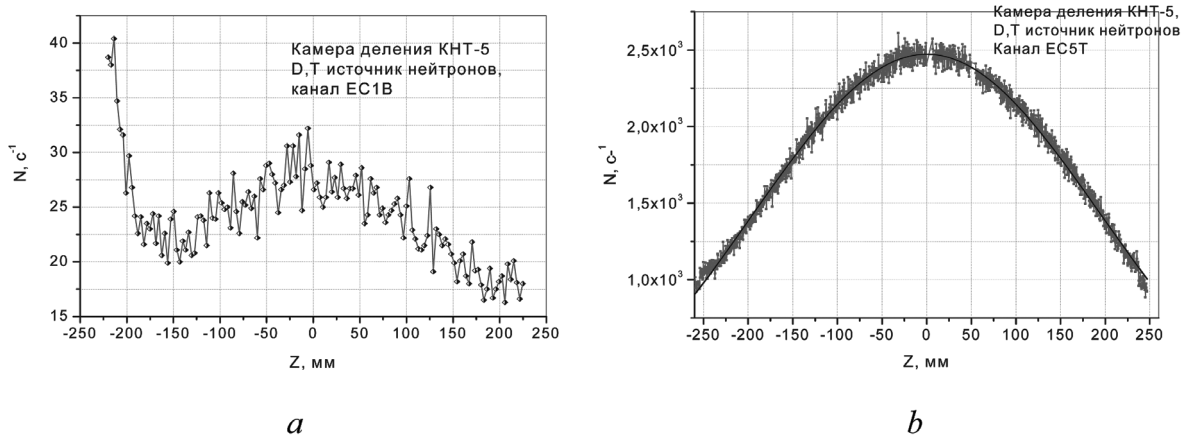


Рис. 5. Аксиальное распределение скорости реакции $^{235}\text{U}(n, f)$, измеренное камерой деления КНТ-5 в экспериментальном канале ЕС1В быстрой зоны (a) и ЕС5Т тепловой зоны (b)

Fig. 5. Axial distribution of the rate of the reaction $^{235}\text{U}(n, f)$ measured by the fission chamber КНТ-5 in the experimental channel ЕС1В of fast zone (a) and ЕС5Т of thermal zone (b)

Ниже приводятся кинетические параметры сборки для второй конфигурации при загрузке 695 твэлов с UO_2 36 %-ного обогащения по ^{235}U в быструю зону и 1185 твэлов с UO_2 10 %-ного обогащения в тепловую зону:

Эффективный коэффициент размножения: $k_{\text{эфф}} = 0,97373 \pm 0,00010$;

Эффективная доля запаздывающих нейтронов: $\beta_{\text{эфф}} = 0,00744 \pm 0,00014$;

Коэффициент размножения нейтронов с учетом внешнего источника ($k_{\text{ист}}$) и коэффициент умножения нейтронов (M) для различных внешних источников нейтронов (табл. 3).

Основные кинетические параметры для третьей конфигурации. Измерения уровня подкритичности проводились с помощью метода обратного умножения в измерительных каналах и методов Гозани и Шёстранда в экспериментальных каналах. Результаты представлены на рис. 7.

На рис. 8 приведена зависимость значений $k_{\text{эфф}}$ от количества загруженного топлива UO_2 21 %-ного обогащения в быструю зону. Кинетические параметры, вычисленные по программе MCNP, для третьей конфигурации составили: $k_{\text{эфф}} = 0,96319 \pm 0,00008$; $\beta_{\text{эфф}} = 0,00740 \pm 0,00009$.

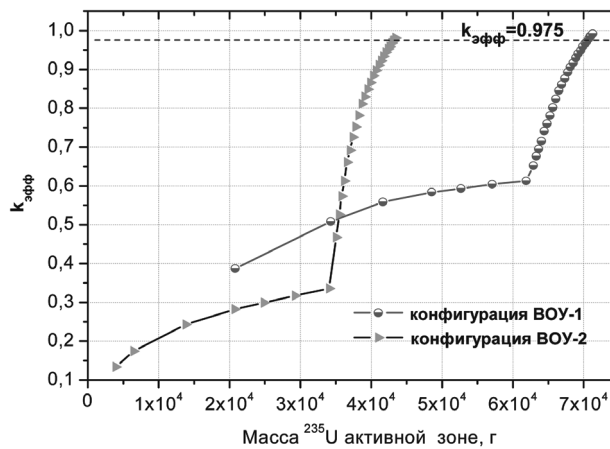


Рис. 6. Сравнение зависимости $k_{\text{эфф}}$ от массы загружаемого топлива, рассчитанной для первой и второй конфигураций подкритической сборки «Яліна-Бустер»

Fig. 6. Comparison of the dependence of k_{eff} on the loaded fuel mass calculated for the first and second configurations of the subcritical assembly “Yalina-Booster”

Т а б л и ц а 2. Зависимость $k_{\text{эфф}}$ от числа твэлов ЭК-10 в тепловой зоне, рассчитанная для первой и второй конфигураций

Table 2. Dependence of k_{eff} on the number of fuel rods EK-10 in the thermal zone calculated for the first and second configurations

Конфигурация активной зоны Active zone configuration	Количество твэлов ЭК-10 в тепловой зоне Number of fuel rods EK-10 in the thermal zone			
	1141	1165	1177	1185
Первая	$0,97943 \pm 0,00022$	$0,98522 \pm 0,00024$	$0,98566 \pm 0,00023$	—
Вторая	$0,96764 \pm 0,00024$	$0,97313 \pm 0,00024$	$0,97486 \pm 0,00023$	$0,97373 \pm 0,0001$

Т а б л и ц а 3. Коэффициент размножения нейтронов с учетом внешнего источника ($k_{\text{ист}}$) и коэффициент умножения (M)

Table 3. Source neutron multiplication factor (k_{src}) and multiplication coefficient (M)

Внешний источник нейтронов External neutron source	Коэффициент Coefficient	
	$k_{\text{ист}}$	M
^{252}Cf	0,98181	55,0
DD	0,98232	56,5
DT	0,98842	85,3

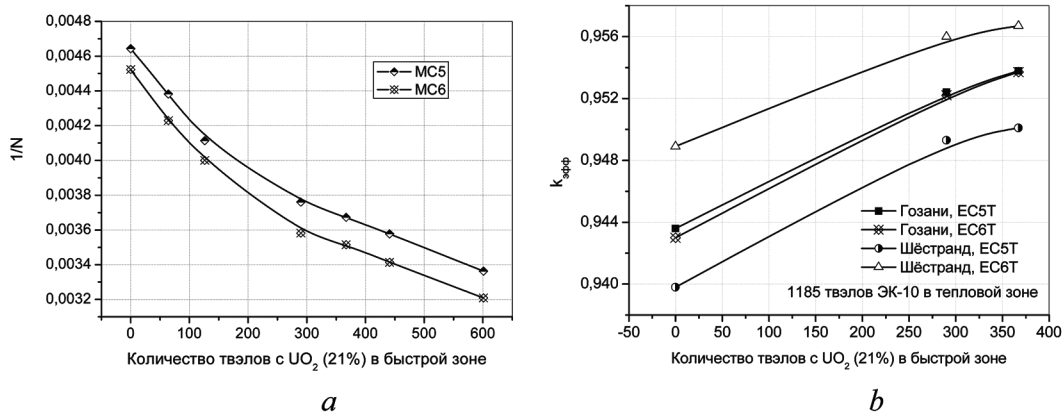


Рис. 7. Зависимость обратной скорости счета (a) и $k_{эфф}$ (b) от количества твэлов с UO₂ 21 %-ного обогащения, загруженных в быструю зону (при 1185 твэлах ЭК-10 в тепловой зоне)

Fig. 7. Dependence of the reciprocal counting rate (a) and k_{eff} (b) on the number of the UO₂ 21%-enriched fuel rods loaded the fast zone (1185 fuel rods EK-10 in the thermal zone)

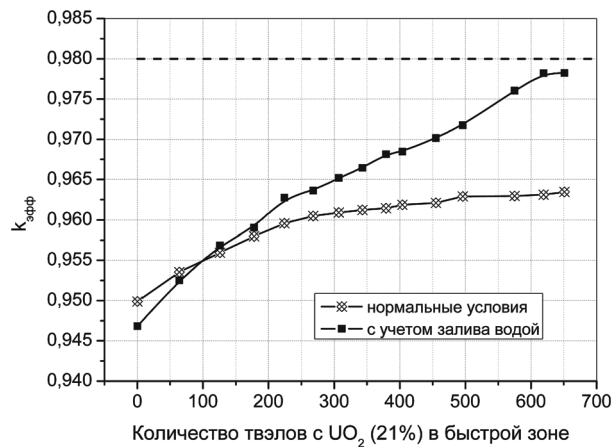


Рис. 8. Зависимость $k_{эфф}$ от количества твэлов с UO₂ 21 %-ного обогащения, загруженных в быструю зону подкритической сборки (третья конфигурация)

Fig. 8. Dependence of k_{eff} on the number of the UO₂ 21 %-enriched fuel rods loaded into the fast zone of the subcritical assembly (third configuration)

Заключение. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования нейтронно-физических характеристик систем, управляемых ускорителями (Accelerator Driven Systems – ADS) на подкритической сборке «Яліна-Бустер» в быстром и тепловом спектрах нейтронов, при различных уровнях подкритичности, в широком диапазоне конфигураций и материального состава.

Во второй конфигурации активной зоны для достижения значения $k_{эфф}$, близкого к значению, полученному в первой конфигурации, потребовалось загрузить дополнительное количество топлива в тепловую зону. Переход на двуокись урана 36 %-ного обогащения в быстрой зоне привел к незначительному уменьшению $k_{эфф}$.

Переход к третьей конфигурации привел к значительному уменьшению эффективного коэффициента размножения нейтронов: до значения $k_{эфф} \approx 0,961$. В связи с отсутствием дополнительного количества топлива UO₂ 10 %-ного обогащения для загрузки в тепловую зону, для достижения $k_{эфф} \approx 0,975$ потребовалось изменение конфигурации быстрой зоны. Проблема может быть решена посредством преобразования прямоугольной формы промежуточной зоны в круговую форму при сохранении количества поглощающих элементов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бустерная подкритическая сборка «Яліна-Бустер», управляемая внешними источниками нейтронов / А. И. Киевицкая [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2006. – Т. 50, № 6. – С. 115–118.
2. IAEA. Working Material, Research Coordinated Meeting of the Coordinated Research Project on “Analytical and Experimental Benchmark Analyses of Accelerator Driven Systems”. 5–9 December 2005, Minsk, Belarus. – Vienna, 2006. – 232 p.
3. Reactivity measurements in the subcritical booster assembly driven by neutron generator / H. Kiyavitskaya [et al.] // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. – 2011. – Vol. 14, N 2. – P. 1–10.
4. Briesmeister, J. F. “MCNP – a general Monte Carlo n-particle transport code, version 4 C: Technical Report LA-13709-M” / J. F. Briesmeister. – Los Alamos National Laboratory, USA, 2000.

References

1. Kiyavitskaya H. L., Koulikovskaya A V., Routkovskaya C. C., Fokov A. Yu., Fokov Yu. G. Booster subcritical assembly “Yalina-B” driven by external neutron sources. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi* [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2006, vol. 50, no. 6, pp. 115–118 (in Russian).
2. IAEA. Working Material, Research Coordinated Meeting of the Coordinated Research Project on “Analytical and Experimental Benchmark Analyses of Accelerator Driven Systems”. 5–9 December 2005. Minsk, Belarus. Vienna, 2006. 232 p.
3. Kiyavitskaya H., Bournos V., Mazanik S., Serafimovich I., Fokov Yu., Routkovskaya Ch., Sadovich S. Reactivity measurements in the subcritical booster assembly driven by neutron generator. *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*, 2011, vol. 14, no. 2, pp. 1–10.
4. Briesmeister J. F. “MCNP – a general Monte Carlo n-particle transport code. Version 4 C: Technical Report LA-13709-M”. Los Alamos National Laboratory, USA, 2000.

Информация об авторах

Фоков Юрий Григорьевич – ст. науч. сотрудник. Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси (ул. академика А. К. Красина, 99, 220109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: fokov@sosny.bas-net.by.

Рутковская Кристина Константиновна – науч. сотрудник. Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси (ул. академика А. К. Красина, 99, 220109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: chris@sosny.bas-net.by.

Для цитирования

Фоков, Ю. Г. Основные нейтронно-физические характеристики подкритической сборки «Яліна-Бустер» при снижении обогащения топлива в быстрой зоне / Ю. Г. Фоков, К. К. Рутковская // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2017. – Т. 61, № 3. – С. 116–122.

Information about the authors

Fokov Yury Grigorievich – Senior researcher. Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (99, Academician Krasin Str., 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: fokov@sosny.bas-net.by.

Routkovskaia Chrystina Kanstantsinauna – Researcher. Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (99, Academician Krasin Str., 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: chris@sosny.bas-net.by.

For citation

Fokov Yu. G., Routkovskaia Ch. K. Main neutronics of the subcritical assembly “Yalina-Booster” when decreasing the fuel enrichment in the fast zone. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi* [Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus], 2017, vol. 61, no. 3, pp. 116–122 (in Russian).