

УДК 621.039; 621.039.52

ПОДКРИТИЧЕСКИЙ СТЕНД «ЯЛІНА» ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОДКРИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ, УПРАВЛЯЕМЫХ УСКОРИТЕЛЯМИ

А.И. Киевицкая, Ю.Г. Фоков

Государственное научное учреждение «Объединённый институт энергетических и ядерных исследований — Сосны» Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

В статье представлен подкритический стенд «ЯЛІНА» Государственного научного учреждения «Объединённый институт энергетических и ядерных исследований — Сосны» Национальной академии наук Беларуси, в состав которого входят две подкритические сборки — уран-полиэтиленовая Яліна-Тепловая и быстро-тепловая Яліна-Бустер, генератор нейтронов НГ-12-1, измерительный комплекс и системы жизнеобеспечения. Стенд «ЯЛІНА» используется для изучения физики и кинетики подкритических размножающих сред с быстрым и тепловым спектрами нейтронов, управляемых внешними источниками, измерений скоростей реакции трансмутации долгоживущих продуктов деления и минорных актинидов и др. Приведены основные технические характеристики подкритическихборок Яліна-Тепловая и Яліна-Бустер, которые являются международными бенчмарками под эгидой МАГАТЭ, а также некоторые расчётные и экспериментальные результаты исследований на этих сборках. Приводятся характеристики нейтронного генератора производства НИИЭФА им. Д.В. Ефремова (г. Санкт-Петербург, Россия), являющегося внешним источником нейтронов для обеихборок. Наличие титан-дейтериевых или титан-тритиевых мишеней позволяет получать нейтроны с энергией ~2,5 и ~14,1 МэВ соответственно. Стенд может использоваться для проведения экспериментальных исследований при проектировании гибридных источников, основанных на применении нейтронов реакции синтез—деление, а также для экспериментальных исследований с целью обоснования материального состава и конструкций бланкетов термоядерных источников нейтронов.

Ключевые слова: подкритический стенд, генератор нейтронов, внешний источник, поток нейтронов, спектр нейтронов, минорные актиниды.

THE SUBCRITICAL FACILITY YALINA TO STUDY NEUTRONICS OF THE SUBCRITICAL SYSTEMS DRIVEN BY ACCELERATORS

H.I. Kiyavitskaya, Yu.G. Fokov

The Joint Institute for Power&Nuclear Research – Sosny, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

The paper describes a subcritical facility YALINA operating in the State Scientific Institution «Joint Institute for Power&Nuclear Research-Sosny», National Academy of Sciences of Belarus. The facility consists of two subcritical assemblies Yalina-Thermal and Yalina-Booster, a neutron generator NG-12-1, a measuring complex and a vital support system. The facility is used to study neutronics and kinetics of subcritical multiplying systems with thermal as well as fast neutron spectra driven by an external source, to measure the transmutation reaction rates for long-lived fission products and minor actinides, and for other measurements. This paper presents some calculated and experimental characteristics of the uranium-polyethylene and fast-thermal assemblies driven by the neutron generator. The subcritical assemblies are international benchmarks under the auspices of the IAEA. The characteristics of the neutron generator manufactured by the D.V. Efremov' SRIFE (St. Petersburg, Russia) are presented also. The titanium-deuterium and titanium-tritium targets allow to generate ~2.5 and 14.1 MeV neutrons, correspondingly. The facility can be used to carry out the experimental research to design hybrid neutron sources based on the usage of the neutrons from fusion-fission reactions, as well as to validate composition and construction of blankets for thermonuclear neutron sources.

Key words: subcritical facility, neutron generator, external neutron source, neutron flux, neutron spectrum, minor actinides.

ВВЕДЕНИЕ

Подкритические системы, управляемые внешними источниками (ADS), рассматриваются в качестве перспективных для выработки энергии и трансмутации радиотоксичных нуклидов [1—6]. В Объединённом институте энергетических и ядерных исследований — Сосны НАН Беларуси в 2000 г. была пущена в эксплуатацию подкритическая уран-полиэтиленовая сборка, управляемая генератором нейтронов для изучения нейтронно-физических характеристик ADS [6]. В 2005 г. была пущена в эксплуатацию быстро-тепловая подкритическая сборка, управляемая генератором нейтронов [7—9]. В настоящее время в состав ядерно-физического стенда «ЯЛІНА» входят две подкритические сборки — Яліна-Тепловая и Яліна-Бустер, генератор нейтронов, измерительный комплекс и необходимые системы жизнеобеспечения. Стенд «ЯЛІНА» позволяет изучать физику и кинетику размножающих сред с быстрым и тепловым спектрами нейтронов при различных уровнях подкритичности. Стенд «ЯЛІНА» изначально был спроектирован без возможности достижения критического состояния [10]. Как известно, стенд MASURKA

(г. Кадараш, Франция) для проведения исследований подкритических систем, управляемых ускорителями (MUSE experiments), был переведён в подкритическое состояние. Подробное описание можно найти на сайте МАГАТЭ <http://www-nfcis.iaea.org/NFCIS> и в работах [5—10].

В данной статье представлены основные характеристики подкритических сборок, генератора нейтронов и некоторые экспериментальные результаты.

ПОДКРИТИЧЕСКАЯ УРАН-ПОЛИЭТИЛЕНОВАЯ СБОРКА ЯЛІНА-ТЕПЛОВАЯ

Проект подкритической сборки Яліна-Тепловая с коэффициентом размножения $k_{эф} < 0,98$ разработан в Опытно-конструкторском бюро «Академическое» НАН Беларуси. Активная зона имеет форму прямоугольного параллелепипеда и состоит из 24 полиэтиленовых топливных кассет, в каждой из которых имеется 16 топливных каналов. Топливо UO_2 10%-ного обогащения по ^{235}U . В центре активной зоны



Рис. 1. Подкритическая уран-полиэтиленовая сборка Яліна-Тепловая

имеется полость для размещения свинцовой мишени. В качестве отражателя используется реакторный графит (рис. 1).

В сборке имеются пять аксиальных экспериментальных каналов и один радиальный канал, которые предназначены для размещения различных образцов и нейтронных детекторов. Три экспериментальных канала радиусом 12,5 мм расположены в активной зоне на расстоянии 50, 100 и 150 мм от центра сборки. Экспериментальные каналы в графитовом отражателе расположены на расстояниях 250 и 358 мм от центра. Радиальный канал расположен в графитовом отражателе на полувысоте активной зоны.

Конструкция подкритической сборки Яліна-Тепловая позволяет:

- изменять конфигурацию активной зоны для получения различных уровней подкритичности ($k_{эф}^{макс} < 0,975$);
- использовать различные внешние источники нейтронов (^{252}Cf ; $D(D, n)^3He$; $D(T, n)^4He$).

ПОДКРИТИЧЕСКАЯ БЫСТРО-ТЕПЛОВАЯ СБОРКА ЯЛІНА-БУСТЕР

Проект подкритической сборки Яліна-Бустер с коэффициентом размножения $k_{эф} < 0,975$ разработан в Опытно-конструкторском бюро НАН Беларуси. Подкритическая сборка Яліна-Бустер так же,

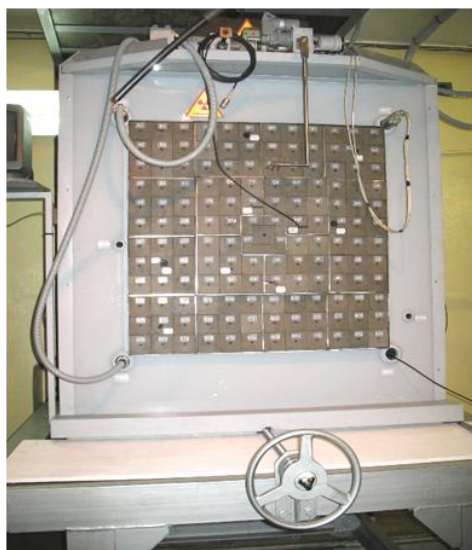


Рис. 2. Подкритическая сборка Яліна-Бустер

как и сборка Яліна-Тепловая, имеет форму прямоугольного параллелепипеда (рис. 2). Активная зона сборки состоит из двух зон. Первая зона имеет жёсткий спектр быстрых нейтронов ($E_n \sim 1$ МэВ). Далее в тексте для краткости эту зону обозначаем как быстрая зона. Вторая зона имеет характерный спектр тепловых нейтронов, и для краткости эту зону обозначаем как тепловая зона. Эти две зоны конструктивно разделены зоной поглотителя тепловых нейтронов (естественный металлический уран и B_4C) для обеспечения односторонней нейтронной связи между зонами. Быстрая зона состоит из 36 свинцовых топливных кассет, тепловая — из 108 полиэтиленовых топливных кассет с твэлами ЭК-10. В центре сборки имеется полость квадратного сечения для размещения свинцовой мишени. Боковая поверхность активной зоны окружена графитовым отражателем и слоем органического стекла. По торцам сборка окружена блоками из борированного полиэтилена.

В быстрой зоне сборки Яліна-Бустер имеются аксиальные экспериментальные каналы ЕС1В, ЕС2В, ЕС3В, ЕС4В, в тепловой зоне — аксиальные экспериментальные каналы ЕС5Т, ЕС6Т, ЕС7Т, в отражателе — аксиальные экспериментальные каналы ЕС8R, ЕС9R и радиальный канал ЕС10R [7—9].

В ходе проведения экспериментальных исследований был реализован целый ряд конфигураций активной зоны подкритической сборки Яліна-Бустер, отличающихся обогащением использованного высокообогащённого топлива в быстрой зоне, а также геометрической конфигурацией промежуточной зоны. В быстрой и промежуточной зонах с прямоугольной конфигурацией исследовалась зависимость нейтронно-физических свойств от обогащения топлива, загружаемого в быструю часть активной зоны:

- высокообогащённым топливом в быстрой зоне (металлический уран 90%-ного обогащения по ^{235}U во внутренней подзоне и двуокись урана 36%-ного обогащения во внешней подзоне);
- двуокисью урана 36%-ного обогащения во всей быстрой зоне;
- двуокисью урана 21%-ного обогащения во всей быстрой зоне.

В быстрой и промежуточной зонах с кольцевой конфигурацией исследовались нейтронно-физические свойства тепловой части активной зоны:

- с кольцевой геометрией быстрой и поглощающей зон;
- с двуокисью урана 21%-ного обогащения в быстрой зоне.

Исследовалась зависимость уровня подкритичности посредством варьирования количества твэлов 10%-ного топлива (твэлы ЭК-10) в тепловой зоне.

ГЕНЕРАТОР НЕЙТРОНОВ НГ-12-1

Генератор нейтронов производства НИИЭФА им. Д.В. Ефремова состоит из линейного ускорителя ионов дейтерия (энергия дейтронов 250 кэВ (рис. 3), ток 1—10 мА) и мишенного блока [11]. Система магнитов сепарирует ионы D^+ магнитными линзами.

Пучок дейтронов падает на титан-тритиевую ($\text{TiT}_{1,5-1,8}$) или титан-дейтериевую ($\text{TiD}_{1,5-1,8}$) мишень и генерирует нейтроны в реакции $\text{D}(\text{T}, n)^4\text{He}$ или $\text{D}(\text{D}, n)^3\text{He}$. Спектры возникающих нейтронов имеют максимумы распределений при значениях энергии 14,1 или 2,45 МэВ соответственно. На подкритическом стенде используются два типа водоохлаждаемых мишеней, различающихся диаметром 230 или 45 мм (рис. 4, 5). Выход нейтронов из титан-тритиевой и титан-дейтериевой мишеней диаметром 230 мм при токе ионного пучка $I_d \sim 12$ мА порядка $1,0 \cdot 10^{12}$ нейтр./с ($E_n = 13-15$ МэВ) и $2,0 \cdot 10^{10}$ нейтр./с ($E_n = 2,5-3,0$ МэВ) соответственно. Выход нейтронов из титан-тритиевой и титан-дейтериевой мишеней диаметром 45 мм при токе ионного пучка $I_d \sim 1$ мА порядка $1,5 \cdot 10^{11}$ нейтр./с и $\sim (2,0-3,0) \cdot 10^9$ нейтр./с соответственно. Генератор нейтронов может функционировать в непрерывном и импульсном режимах. В импульсном режиме длительность импульса может изменяться в интервале $0,5 \text{ мкс} \leq \tau \leq 100 \text{ мкс}$, частота повторения — $1 \text{ Гц} \leq \omega \leq 10 \text{ кГц}$.

На подкритических сборках Яліна-Тепловая и Яліна-Бустер проводились и продолжают исследования по следующим направлениям:

- пространственная кинетика подкритических систем, управляемых внешними источниками нейтронов;
- адаптация экспериментальных методов определения реактивности и других параметров, разработанных для критических систем, к подкритическим системам;
- измерение скорости реакции трансмутации продуктов деления и минор-актинидов;



Рис. 3. Генератор нейтронов НГ-12-1



Рис. 4. Мишенное устройство диаметром 230 мм



Рис. 5. Мишенное устройство диаметром 45 мм

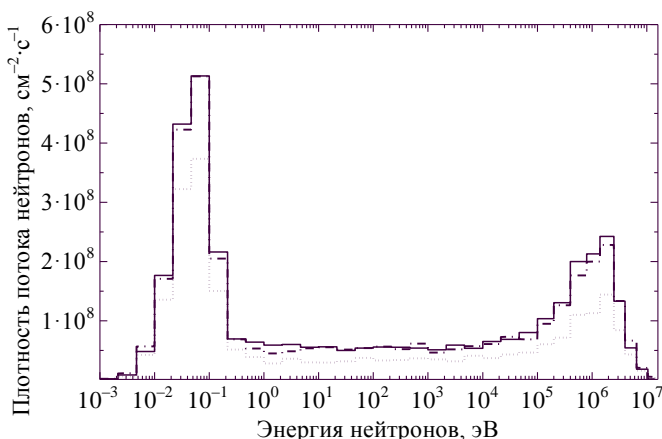


Рис. 6. Спектры нейтронов в экспериментальных каналах ЕС1 (—), ЕС2 (---) и ЕС3 (····) уран-полиэтиленовой подкритической сборки. В качестве внешнего источника использовалась реакция (D, T). Интенсивность источника в расчётах принималась равной 10^{12} нейтр./с. Нормировка на один нейтрон источника

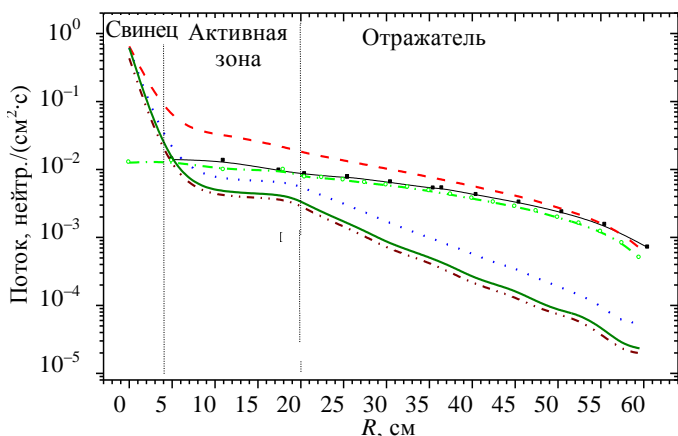


Рис. 7. Зависимость плотности потока нейтронов с разной энергией от радиуса подкритической сборки Яліна-Тепловая для ^{252}Cf -источника: <1 эВ, тепл. (—□—); >100 кэВ (····); >0,75 (—) МэВ; >1,00 МэВ (---); полный поток (---); эксперимент, ^3He -детектор (■). Источник расположен в центре активной зоны. Интенсивность потока нейтронов источника составила $0,7 \cdot 10^7$ нейтр./с. Нормировка проведена на один нейтрон источника

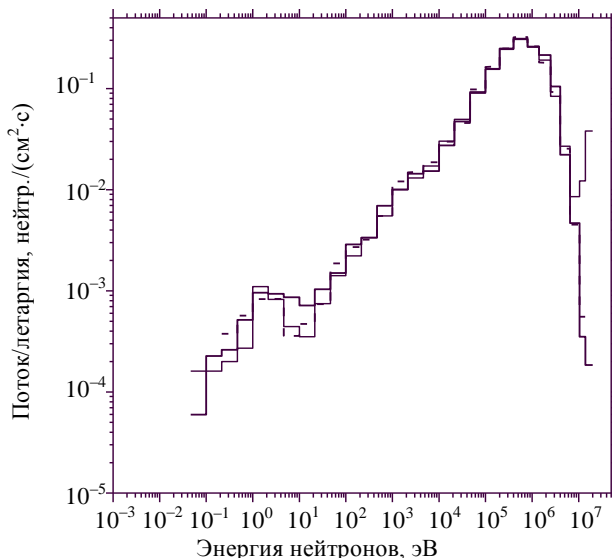


Рис. 8. Рассчитанные спектры нейтронов в экспериментальном канале ЕС1В для сборки с базовой конфигурацией и с разными внешними источниками нейтронов: — DD; --- ^{252}Cf ; — DT

- восстановление нейтронных спектров методом пороговых детекторов;
- анализ безопасности подкритических систем;
- нейтронно-активационный анализ.

На рис. 6 представлено распределение плотности нейтронов при облучении нейтронами энергией 14 МэВ (DT-реакция) в экспериментальных каналах подкритической уран-полиэтиленовой (тепловой) сборки.

Характерной чертой распределения потока нейтронов является наличие максимумов в области низких ($E_n \sim 0,02\text{—}0,08$ эВ) и высоких ($E_n \sim 10\text{—}14$ МэВ) энергий, а также очень слабая зависимость плотности потока нейтронов от энергии в интервале $E_n \sim 1$ эВ— 10^5 эВ. Видно, что число нейтронов в области максимумов $E_n \sim 2$ или 14 МэВ уменьшается в экспериментальных каналах, находящихся на периферии сборки, по сравнению с экспериментальным каналом, расположенным около нейтронпроизводящей мишени [12].

На рис. 7 представлены рассчитанные по коду MCNP 4B [12] радиальные зависимости плотности потока нейтронов в подкритической сборке Яліна-Тепловая для ^{252}Cf -источника от интервалов энергий. Максимальный поток быстрых нейтронов наблюдается в свинцовой мишени (в основном это нейтроны источника). В активной зоне и графитовом отражателе преобладают тепловые нейтроны. Полный поток нейтронов слабо изменяется по активной зоне и спадает к границе отражателя с биологической защитой. Отметим, что плотности потока тепловых нейтронов, измеренные гелиевым детектором, достаточно хорошо согласуются с расчётными значениями [13].

На рис. 8—10 представлены спектры нейтронов, полученные расчётным путём по программе MCNP-4B [12] (нормировка на один нейтр. источника/с) с библиотекой ядерных сечений ENDFB/VI [14, 15], в экспериментальных каналах подкритической сборки Яліна-Бустер для различных источников нейтронов: в быстрой зоне (канал ЕС1В), тепловой зоне (канал ЕС5Т) и графитовом отражателе (ЕС10R). В быстрой зоне (канал ЕС1В) формируется очень жёсткий спектр нейтронов ($E \sim 1$ МэВ), в тепловой зоне и графитовом отражателе (каналы ЕС5Т и ЕС10R) наблюдаются оба пика.

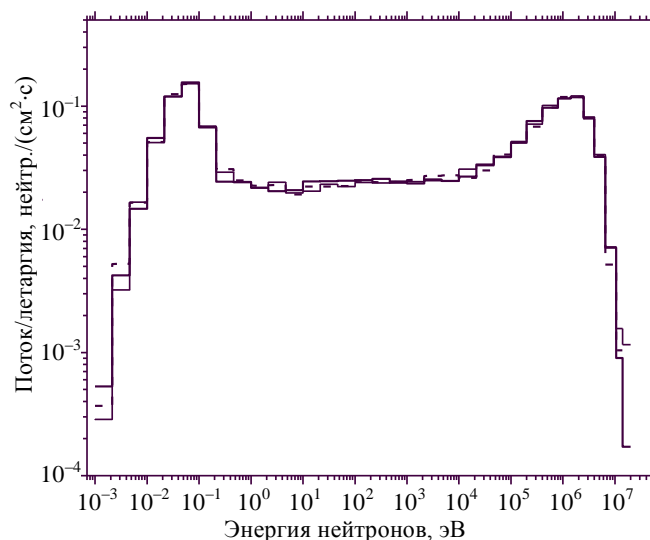


Рис. 9. Рассчитанные спектры нейтронов в экспериментальном канале EC5T для сборки с базовой конфигурацией и с разными внешними источниками нейтронов: — DD; --- ^{252}Cf ; -·-·- DT

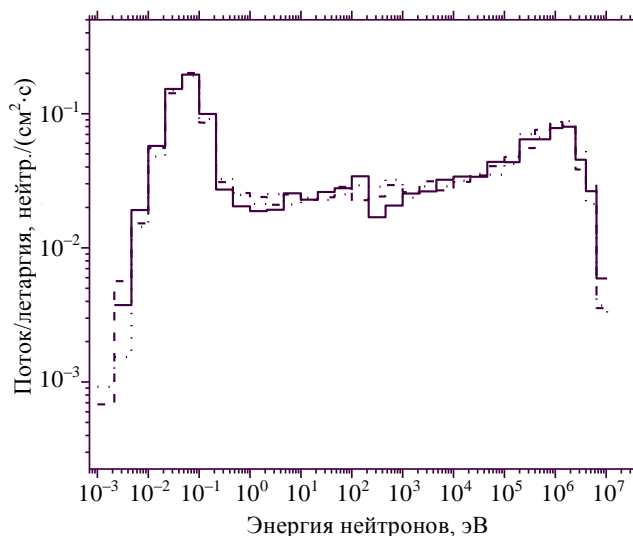


Рис. 10. Рассчитанные спектры нейтронов в экспериментальном канале EC10R для сборки с базовой конфигурацией и с разными внешними источниками нейтронов: — DD; --- ^{252}Cf ; ····· DT

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подкритический стенд «ЯЛІНА» — ядерно-физическая установка, созданная как прототип будущей ADS. Проведённые исследования в рамках проектов государственных программ научных исследований НАН Беларуси, проектов Международного научно-технического центра, исследовательского Интегрированного проекта 6-й Рамочной европейской программы, а также исследовательских контрактов МАГАТЭ подтвердили перспективность установок нулевой мощности для изучения физических и кинетических характеристик подкритических систем, управляемых ускорителями заряженных частиц. На подкритическом стенде «ЯЛІНА» имеются возможности и опытный персонал для проведения экспериментальных исследований с целью обоснования конструкций бланкетов для термоядерных источников нейтронов.

REFERENCES

1. **Bowman C.D.** Accelerator Driven Systems in Nuclear Energy. Role and Technical Approach. Report ADNA/97 – 013. ADNA Corporation, Los Alamos. New Mexico, 1997.
2. **Subbotin V.I.** Accelerators can do nuclear energetics more safe.: Preprint JINR (Joint Institute for Nuclear Research) P1-99-97. — Dubna, 1999. 24 p. (in Russian)
3. **Vasil'kov R.G. et al.** Electrical-nuclear method of neutrons generation. — Atomnaya energiya (Atomic energy), 1970, vol. 29, issue 3, pp. 151—158 (in Russian)
4. **Rubbia C., Rubio J.O., Buono S. et al.** Conceptual design of a fast neutron operated high power energy amplifier. — IAEA-TECDOC-985, 1997, pp. 187—312.
5. **Chigrinov S.E., Kievitskaia A.I., Khilmanovich A.M. et al.** Experimental research of the transmutation of long-lived fission products and minor – actinides in a subcritical assembly driven by a neutron generator. — In: Proc. of ADTTA'96 Conf. Kalmar, Sweden, 1996, vol. 2, pp. 737—744.
6. **Kievitskaya A.I.** Investigations in the field of perspective nuclear power systems for energy production and burning of radioactive wastes. — Energeticheskaya strategiya (Power strategy), 2009, № 5, pp. 28—31 (in Russian)
7. **Chigrinov S.E. et al.** Booster subcritical assembly «Yalina-B» driven by neutron generator: Preprint JIPNR-14 (Joint Institute for Power&Nuclear Research). — Minsk, 2004. 31 p. (in Russian)
8. **Kievitskaya A.I. et al.** Booster subcritical assembly «Yalina-B» driven by external neutron sources. — In coll.: Reports of Belarus National Academy of Sciences, 2006, vol. 50, № 6, pp. 115—118 (in Russian)

9. **Burnos V.V., Kievitskaya A.I., Kulikovskaya A.V., Rutkovskaya K.K., Serafimovich I.G., Fokov A.Yu., Fokov Yu.G., Khil'manovich A.M.** Subcritical assembly «Yalina-Booster», driven by external neutron sources. — In coll.: Abstracts of the V-th Conference on high energy physics, nuclear physics and accelerators. National Scientific Centre «Kharkov Institute of Physics and Technology», Kharkov, 26 February — 2 March 2007, p. 66 (in Russian)
10. **Kiyavitskaya H.I., Serafimovich I.G., Burnos V.V. et al.** Transmutation of fission products and minor actinides in a subcritical assembly driven by a neutron generator. — In: NATO Advanced Research Workshop «Nuclear Science and Safety in Europe». Yalta, Ukraine, 10—16 September 2005. — Springer. Netherlands. Series B: Physics and Biophysics, pp. 265—274.
11. **Bulyga S.F. et al.** Neutron generator NG-12-1 — base facility for investigations in Neutron centre of Belarus National Academy of Sciences: Preprint IRPhChP-21 (Institute of radiation physical-chemical problems). — Minsk, 1998. 36 p. (in Russian)
12. **Briesmeister J.F.** MCNP — a general purpose *N*-particle transport code, version 4B: Report LA-12625-M. Los Alamos National Laboratory, 1997.
13. **Burnos V.V., Kievitskaya A.I., Korneev S.V. et al.** The subcritical facility «YaLINA» for neutrons generation and experimental research in ADS-technology.: Preprint JIPNR-24 (Joint Institute for Power&Nuclear Research). — Minsk, 2006. 22 p. (in Russian)
14. **ENDF-102** Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data File ENDF-6, BNL-NCS-44945 (ENDF-102). Ed. by P.F. Rose, C.L. Dunford. Revision 10/91, October 1991.

AUTHORS

Kiyavitskaya H.I. The Joint Institute for Power&Nuclear Research – Sosny, National Academy of Sciences of Belarus, Akademika A.K. Krasina ul. 99, 220109 Minsk, Belarus; anna@sosny.bas-net.by

Fokov Yu.G. The Joint Institute for Power&Nuclear Research – Sosny, National Academy of Sciences of Belarus, Akademika A.K. Krasina ul. 99, 220109 Minsk, Belarus

Received 27 May 2015
 Problems of Atomic Science and Technology
 Ser. Thermonuclear Fusion, 2015, vol. 38, issue 3, pp. 53—58.