

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМНОЖАЮЩИХ СВОЙСТВ НЕЙТРОНОПРОИЗВОДЯЩЕЙ МИШЕНИ ЭЯУ

Т.А. Фролова

Институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ
249040, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, 1



Одним из основных компонентов электроядерных установок (ЭЯУ) является нейtronопроизводящая мишень, обеспечивающая установку нейтронами. Нейтроны образуются за счет реакции глубокого расщепления тяжелых ядер и последующего их размножения в каскадном процессе взаимодействия вторичных высокозергетических частиц с ядрами мишени, подкритической активной зоны и бланкета. В среднем на один протон с энергией 1 ГэВ при реакции глубокого расщепления в мишени, содержащей ядра тяжелых элементов (например, Hg, Ta, W, U), возникает от 20-ти (на Hg и Pb) до 50-ти (на U) нейтронов.

В последние годы успешно разрабатываются жидкокометаллические свинцово-висмутовые мишени. В работе показано, что для материала мишени существует оптимальный размер, который при заданном значении энергии налетающих частиц приводит к выходу максимального числа нейтронов «spallation». Представлены результаты расчетов энергетического спектра нейтронов, образующихся в реакциях взаимодействия протонов с тяжелыми мишениями для энергетического диапазона первичных протонов от 0,8 до 1,4 ГэВ.

Анализ изменения скорости генерации нейтронов для цилиндрической мишени диаметром 10 см и длиной от 1 до 120 см при энергиях налетающего протона от 0,8 до 1,4 ГэВ позволил рассчитать оптимальные размеры мишени из тяжелых ядер для проектируемых ЭЯУ. Проведена оптимизация размеров нейtronопроизводящих мишеней из натуральных изотопов ^{nat}Bi , ^{nat}Hg , ^{nat}Pb и ^{nat}W .

Ключевые слова: ЭЯУ, нейtronопроизводящая мишень, выход нейтронов, спектр нейтронов, MCNPX.

ВВЕДЕНИЕ

Глубокое расщепление ядер представляет собой сложный процесс, инициируемый, как правило, протонами или дейtronами с энергиями порядка гигаэлектронвольт. Реакция глубокого расщепления происходит в четыре стадии. На первой стадии, называемой внутриядерным каскадом, налетающая частица взаимодействует с нуклонами ядра мишени. Это приводит к испусканию вторичных частиц очень высоких энергий (нейтронов, протонов, пионов) и к образованию высоковозбужденного остаточного ядра. Испущенные быстрые легкие частицы продолжают порождать цепные внутриядерные каскады, которые затухают по мере потери энергии. В то же время высоковозбужден-

ное остаточное ядро проходит через промежуточную стадию с испусканием протонов, нейтронов, дейtronов или альфа-частиц. Затем происходит либо «испарение» ядра, либо распад. Окончательное девозбуждение ядра происходит с испусканием позитронов и гамма-квантов.

В среднем на один протон с энергией 1 ГэВ при реакции глубокого расщепления в мишени, содержащей ядра тяжелых элементов (например, Hg, Ta, W, U), возникает от 20-ти (на Hg и Pb) до 50-ти (на U) нейтронов. При этом в объеме мишени выделяется около 30 МэВ энергии на каждый «полезный» нейтрон. Доля энергии, переходящая в тепло и нагревающая мишень, составляет примерно 60%, остаток энергии уносится из объема мишени нейтронами. Спектр испускаемых нейтронов очень широк и при средней энергии испарительных нейтронов ~ 2 МэВ простирается вплоть до одного гигаэлектронвольта.

В качестве материалов для мишеней рассматриваются тяжелые элементы, такие как свинец, висмут, ртуть, tantal, вольфрам. На ранних этапах развития технологии мишеней предпочтение отдавалось твердым мишеням, однако, как показали исследования, они быстро изнашиваются и требуют частой замены, в связи с чем в последние годы успешно разрабатываются жидкокометаллические свинцово-висмутовые мишени. Главная проблема, связанная с использование жидких металлов в мишени, – это повышенные требования к износостойкости от коррозии к материалам жидкокометаллического контура. Несмотря на все трудности технология мишеней для производства нейтронов активно развивается в ряде стран. Существуют опытные образцы мишеней для ЭЯУ, удовлетворяющие предъявляемым к ним требованиям по производству необходимого количества нейтронов [1 – 3].

РАСЧЕТНАЯ ПРОГРАММА MCNPX 26C

Одна из основных величин, представляющей интерес в большинстве приложений нейтронопroducing мишени, – это количество нейтронов, произведенных пучком падающих частиц на мишень «п/р» [4, 5]. С помощью программного комплекса MCNPX 26C были выполнены расчеты спектров нейтронов при взаимодействии протонов в энергетическом диапазоне от 0,8 до 1,4 ГэВ с мишенью из тяжелого металла. Данная программа позволяет рассчитывать транспорт 34-х типов частиц при энергиях до нескольких гигаэлектронвольт, используя стандартные библиотеки оцененных ядерных данных для протонов, нейтронов и гамма-квантов, а также содержит модели ядерных реакций, позволяющие рассчитывать данные при энергиях выше 150 МэВ. Программа MCNPX 26C [6 – 9], используемая в работе для расчета активационных данных при описании взаимодействий при высоких энергиях, включает в себя следующие физические модели: внутриядерного каскада – Bertini [10 – 12], ISABEL [13], INCL4 [14, 15]; испарительную и испарительно-делительную – Dresner [16] и ABLA [17]. Предусмотрены произвольные комбинации этих моделей, включение предравновесной стадии, описываемой в рамках многоступенчатой предравновесной модели, учет фрагментации для легких ядер и деления для тяжелых ядер. Также включена CEM03.01 – каскадно-экзитонная модель [18]. При расчете выхода нейтронов использовалась модель ISABEL/MPM/Bertini [19, 20].

Использование библиотеки LA-150 [21], содержащей ядерные данные для 42-х нуклидов от водорода до висмута для реакций с нуклонами, мотивировано желанием повысить точность при расчетах в энергетическом диапазоне ниже 150 МэВ.

РАСЧЕТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА НЕЙТРОНОВ

Рассчитывались энергетические спектры нейтронов, образующихся в реакциях взаимодействия протонов с «тяжелыми» мишенями. Получены данные для ^{nat}Pb - ^{nat}Bi - ^{nat}Hg - ^{nat}Ta - и ^{nat}W -мишней диаметром 10 см и длиной 60 см, когда протоны ударяются о цилиндрическую мишень параллельно ее оси.

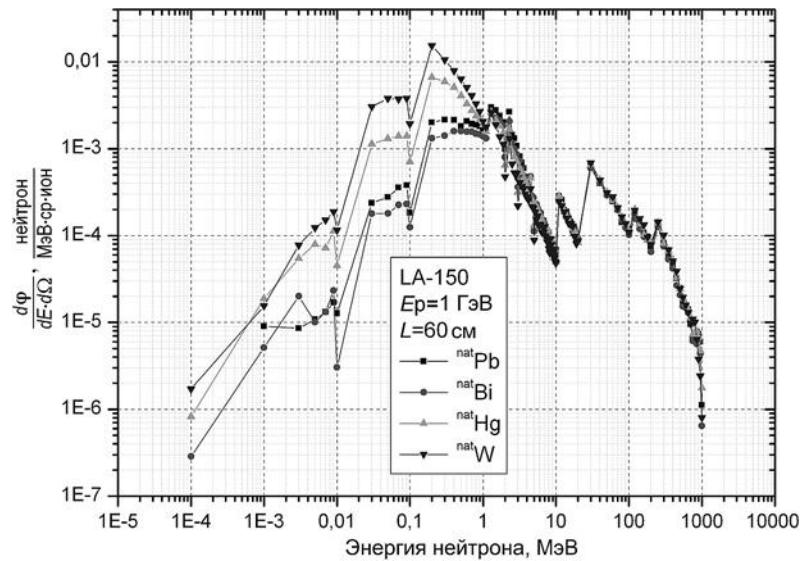


Рис. 1. Спектры нейтронов в реакциях $p + {}^{nat}\text{Pb}$, $p + {}^{nat}\text{W}$, $p + {}^{nat}\text{Bi}$, и $p + {}^{nat}\text{Hg}$

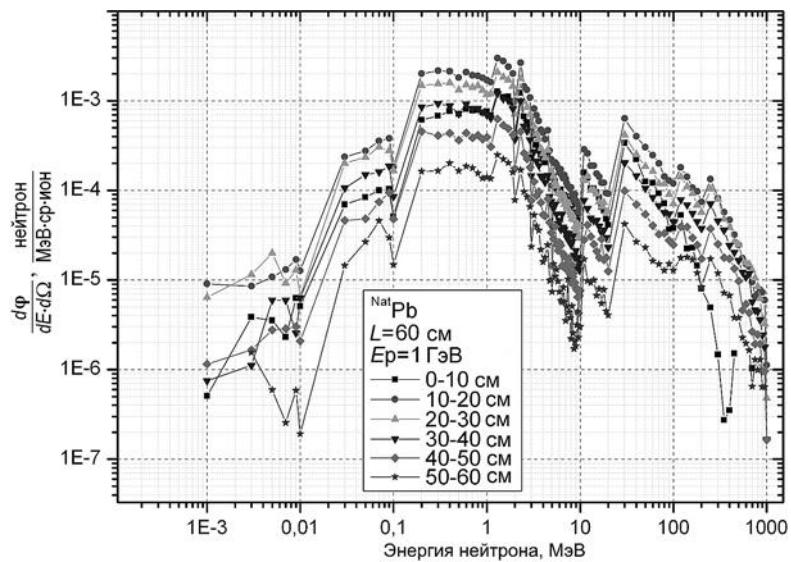


Рис. 2. Зависимость спектра нейтронов в реакциях $p + {}^{nat}\text{Pb}$ от расстояния точки входа пучка в мишень

На рисунке 1 представлена множественность частиц, рождающихся при неупругом столкновении протона с энергией 1 ГэВ с ядрами свинца, вольфрама, висмута и ртути (библиотека LA-150). Множественность частиц, рождающихся при взаимодействии с висмутом, практически совпадает с данными для свинца. Для ртути были получены результаты на 30% больше по сравнению со свинцом, для вольфрама – на 35%.

Цилиндрическая мишень была разделена на шесть зон. Для каждой зоны был построен график зависимости спектра нейтронов от расстояния точки входа пучка в мишень; видно, что выход нейтронов максимальен во второй зоне при $Z \approx 10 - 20 \text{ см}$ и быстро спадает при больших значениях Z (рис. 2).

Множественность частиц для ${}^{nat}\text{Pb}$ увеличивается при росте энергии налетающего протона (рис. 3). Для энергии протона 1,4 ГэВ были получены результаты на 35% больше, чем для энергии 0,8 ГэВ, на 24 % больше, чем для энергии 1 ГэВ и на 16% больше, чем для 1,2 ГэВ.

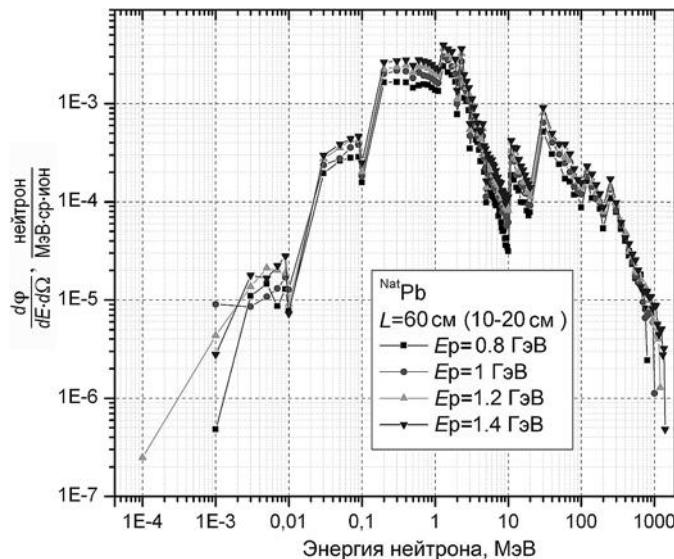


Рис. 3. Спектры нейтронов в реакциях $p + ^{nat}\text{Pb}$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ МИШЕНИ

Для цилиндрических мишени из вольфрама, свинца и ртути радиусом 10 см, облученных протонами с энергиями от 0,8 до 1,4 ГэВ, были рассчитаны полный выход нейтронов, количество нейтронов, покинувших мишень и поглощенных мишенью. Вычисления проводились для различных длин мишени в диапазоне от 1 до 120 см. Графики расчетов представлены на рис. 4.

Те же расчеты были проделаны для различных радиусов мишени. Их графики показаны на рис. 5.

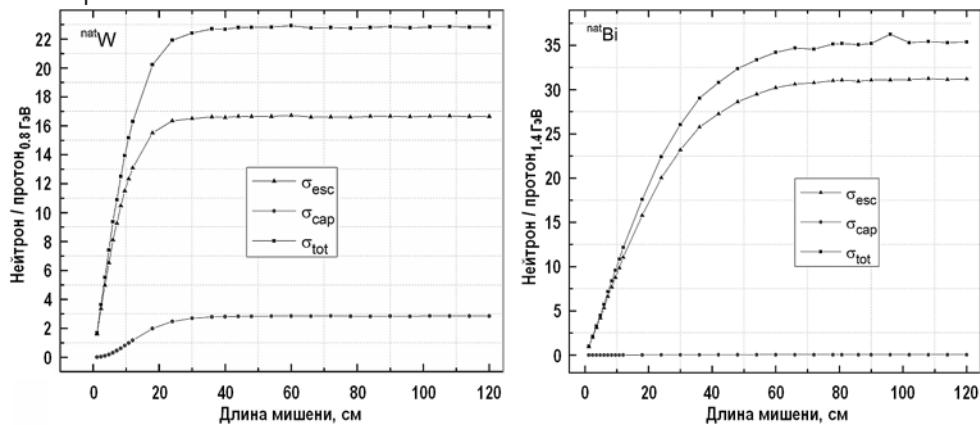


Рис. 4. Изменение скорости генерации нейтронов для цилиндрических мишени из ^{nat}W и ^{nat}Bi диаметром 10 см и длинами от 1 до 120 см

Как видно из графиков, полный нейтронный выход растет с увеличением радиуса мишени, постепенно приближаясь к пологому участку кривой при больших значениях радиуса R . Число нейтронов, покинувших мишень, растет с увеличением радиуса мишени и достигает максимума, после которого оно уменьшается с увеличением радиуса мишени. В случае свинцовой мишени такое уменьшение незначительно для радиуса мишени больше 160 см. Это является следствием очень маленького сечения поглощения нейронов в свинце. Число поглощенных нейронов растет с увеличением радиуса мишени. Скорость становится меньше при больших радиусах мишени, кривая поглощения выравнивается.

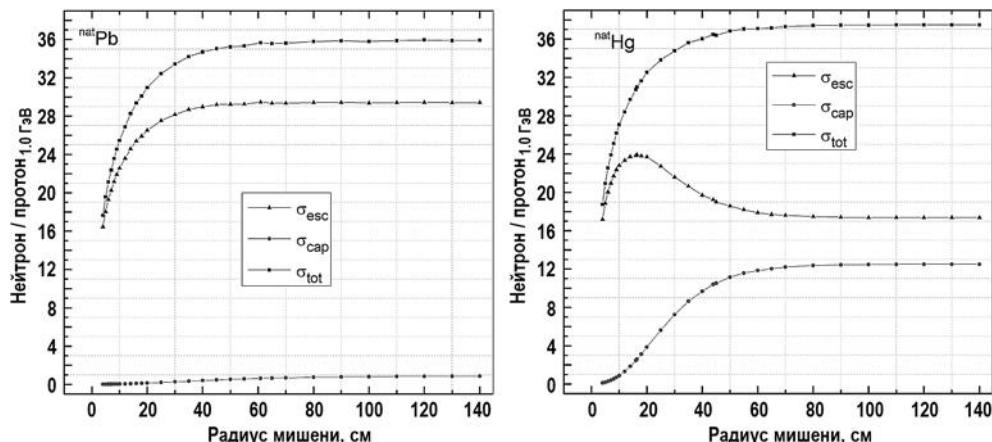


Рис. 5. Изменение скорости генерации нейтронов для ^{nat}Pb и ^{nat}Hg в мишениях различных радиусов

Выполнены оценки оптимальных размеров цилиндрической нейtronопроизводящей мишени из натурального свинца, висмута, вольфрама и ртути для налетающих протонов с энергиями от 0,8 до 1,4 ГэВ. Для различных диапазонов значений длины и радиуса мишени получены данные по количеству нейтронов, которые покинули мишень. Для определения оптимальных размеров мишени выбраны параметры с максимальными значениями нейтронов, покинувших мишень. Полученные данные представлены в табл. 1.

Таблица 1

Оптимальные размеры нейtronопроизводящей мишени

Мишень	Протоны 800 МэВ			Протоны 1 ГэВ			Протоны 1,4 ГэВ		
	R , см	L , см	Нейтроны, покинувшие мишень	R , см	L , см	Нейтроны, покинувшие мишень	R , см	L , см	Нейтроны, покинувшие мишень
^{nat}Pb	55	57.2	21.75	60.9	60	29.45	59.5	86.4	44.65
^{nat}W	10	44	16.65	9	44.1	22.14	10	57.2	32.23
^{nat}Hg	16.1	59.2	18.16	16.4	46.5	23.93	17.2	75	35.55
^{nat}Bi	54	47.3	20.97	69	57.9	29.17	65.6	80.8	44.62

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Для протонов с энергией от 0,8 до 1,4 ГэВ, взаимодействующих с мишенью из тяжелых ядер ^{nat}Hg , ^{nat}Bi , ^{nat}Pb , ^{nat}Ta и ^{nat}W , выполнены расчеты выхода нейтронов для всего энергетического диапазона.
- Проанализирован энергетический спектр нейтронов, образующихся в реакциях взаимодействия протонов с энергией 1 ГэВ с тяжелыми мишениями.
- Анализ изменения скорости генерации нейтронов для цилиндрических мишеней диаметром 10 см и длиной от 1 до 120 см при энергиях налетающих протонов от 0,8 до 1,4 ГэВ позволил рассчитать оптимальные размеры мишеней из тяжелых ядер для проектируемых ЭЯУ.

Литература

- Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles, OECD/NEA, № 4453, 2002.
- Accelerator and Spallation Target Technologies for ADS Applications, OECD/NEA, № 5421, 2005.
- Artisyuk V., Konobeyev A., Stankovskiy A. Analysis of spallation products effect on the ADS safety and adjacent fuel cycle, Proceedings PSI, ARIA 08. PP. 157-163.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ОБЪЕКТАХ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

4. Abderrahim H. A., Galambos J., Gohara Y., Henderson S., Lawrence G., McManamy T., Muellerg A. C., Nagaitsev S., Nolena J., Pitchere E., Rimmerf R., Sheffiede R., Todosow M. Accelerator and Target Technology for Accelerator Driven Transmutation and Energy Production, FERMILAB-FN-0907-DI, LA-UR-10-06754, 2010.
5. Барашенков В.С. Ядерно-физические аспекты электроядерного метода. // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1978. Т. 9. Вып. 5.
6. Hendricks J.S., McKinney G.W., Durkee J.W., Finch J.P., Fensin M.L., James M.R., Johns R.C., Pelowitz D.B., Waters L.S. MCNPX Version 26C, LA-UR06-7991, 2006.
7. Hendricks J.S., McKinney G.W., Fensin M.L., James M. R., Johns R.C., Durkee J.W., Finch J.P., Pelowitz D.B., Waters L.S., Johnson M.W., dan Gallmeier F. X. MCNPX 2.6.0 Extensions, Report LA-UR-08-2216, Los Alamos National Laboratory, 2008.
8. MCNP4C - Monte Carlo N-Particle Transport Code System, Los Alamos National Laboratory, July 2000.
9. Hendricks J.S., McKinney G.W., Waters L.S., Roberts T.L., Egeldorf H.W., Finch J.P., Trellue H.R., Pitcher E.J., Mayo D.R., Swinhoe M.T., Tobin S.J., Durkee J.W., Gallmeier F.X., David J.-C. MCNPX EXTENSIONS Version 2.5.0, LANL Report LA-UR-05-2675, Los Alamos, 2005.
10. Gudima K.K., Ososkov G.A., Toneev V.D., Model for Pre-Equilibrium Decay of Excited Nuclei, // Soviet Journal of Nuclear Physics. – 1975. – Vol. 21. – P.138.
11. Bertini H.W., Low-Energy Intranuclear Cascade Calculation. // Physical Review. – 1963. – Vol. 131. – PP. 1801-1821.
12. Bertini H.W. Intranuclear Cascade Calculation of the Secondary Nucleon Spectra from Nucleon-Nucleus, Interactions in the Energy Range 340 to 2900 MeV and Comparison with Experiment. // Physical Review. – 1969. – Vol. 188. – PP. 1711 -1730.
13. Amelin N. Physics and Algorithms of the Hadronic Monte-Carlo Event Generators. Notes for a Developer, CERN/IT/ASD Report CERN/IT/99/6, Geneva, Switzerland and JINR/LHE, Dubna, Russia; Geant4 User's Documents, Physics Reference Manual, 1998.
14. Fong P. Statistical Theory of Nuclear Fission, Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1969.
15. Chandler K.L., Armstrong T.W. Oak Ridge National Laboratory Report ORNL-TM-4744, 1972.
16. Dresner L. EVAP, A Fortran Program for Calculation the Evaporation of Various Particles from Excited Compound Nuclei, Oak Ridge National Laboratory, ORNL-TM-196, 1962.
17. Junghans A.R., de Jong M., Clerc H.-G., Ignatyuk A.V., Kudyaev G.A., Schmidt K.-H. Projectile-Fragment yields as a Probe for the Collective Enhancement in the Nuclear Level Density. // Nuclear Physics A. – 1998. – Vol. 629. – P. 635.
18. Mashnik S.G., Gudima K.K., Sierk A.J., Baznat M.I., Mokhov N.V. CEM03.01 User Manual, LANL Report LA-UR-05-7321, Los Alamos, 2005.
19. Natalenko A.A., Konobeyev A.Yu., Stankovskiy A.Yu., Mashnik S.G. High Energy Activation Data Library (HEAD-2009), Los Alamos National Laboratory Report, LA-UR-10-01397, 2010.
20. Коровин Ю.А., Наталенко А.А., Пильнов Г.Б., Конобеев А.Ю., Станковский А.Ю., Тихоненко А.В. Библиотека протонных активационных ядерных данных НЕРАД-2008. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2009. – №3. – С. 97-105.
21. Chadwick M.B., Hughes H.G., Little R.C., Pitcher E.J., Young P.G. Physics Models and Nuclear Data Evaluations for Enhanced Monte Carlo Transport, LANL Report LA-UR-00-3601, Los Alamos National Laboratory, 2000.

Поступила в редакцию 01.04.2016 г.

Автор

Фролова Татьяна Александровна, аспирант

E-mail: frolova_ta@inbox.ru

OPTIMIZATION OF BREEDING PROPERTIES OF THE SPALLATION NEUTRON SOURCE TARGET FOR ADS

Frolova T.A.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, National Research Nuclear University «MEPhI». 1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 240040 Russia

ABSTRACT

One of the main components of an ADS is the spallation target, providing power plant by neutrons. This neutron source provides primary neutrons that multiply in the surrounding subcritical core or in the blanket in which transmutation reactions proceed. These primary neutrons are produced by the spallation reactions when heavy target nuclei are bombarded by high-energy protons from the accelerator. On average, per proton with the energy of 1 GeV under the spallation reactions in target containing nuclei of heavy elements (for example, Hg, Ta, W, U,) arises from 20 (for Hg and Pb) to 50 (for U) neutrons. Heavy elements such as lead, bismuth, mercury, tantalum and tungsten are considered as suitable materials for the targets. In the last years successfully developed lead-bismuth eutectic target.

In this paper shown that for every target material and energy there is an optimal target size which results in the escape of a maximum number of spallation neutrons from the target. Represented the results of calculations of the energy spectrum of neutrons produced in the reactions of the interaction of protons with heavy targets for the energy range of primary protons from 0.8 to 1.4 GeV.

Analysis changes of the neutron generation rate for the cylindrical target of diameter 10 cm and length of 1 to 120 cm at incident proton energies from 0.8 to 1.4 GeV made possible to calculate the optimum size of the target of heavy nuclei, for designed ADS. Optimization sizes of spallation neutrons target from ^{nat}Bi , ^{nat}Hg , ^{nat}Pb and ^{nat}W were done.

Key words: ADS, spallation neutron source target, neutron yield, neutron spectrum, MCNPX.

REFERENCES

1. Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles, OECD/NEA, № 4453, 2002.
2. Accelerator and Spallation Target Technologies for ADS Applications, OECD/NEA, № 5421, 2005.
3. Artisyuk V., Konobeyev A., Stankovskiy A. Analysis of spallation products effect on the ADS safety and adjacent fuel cycle, Proceedings PSI, ARIA 08, p. 157-163.
4. Abderrahim H. A., Galambos J., Gohara Y., Henderson S., Lawrencee G., McManamy T., Muellerg A. C., Nagaitsev S., Nolena J., Pitchere E., Rimmerf R., Sheffielde R., Todosow M. Accelerator and Target Technology for Accelerator Driven Transmutation and Energy Production, FERMILAB-FN-0907-DI, LA-UR-10-06754, 2010.
5. Barashenkov V.S. Yaderno-fizicheskie aspekty elektroyadernogo metoda. *Fizika elementarnykh chastits i atomnogo yadra*, 1978, v. 9, iss. 5 (in Russian).
6. Hendricks J.S., McKinney G.W., Durkee J.W., Finch J.P., Fensin M.L., James M.R., Johns R.C., Pelowitz D.B., Waters L.S. MCNPX Version 26C, LA-UR06-7991, 2006.
7. Hendricks J.S., McKinney G.W., Fensin M.L., James M.R., Johns R.C., Durkee J.W., Finch J.P., Pelowitz D.B., Waters L.S., Johnson M.W., dan Gallmeier F.X. MCNPX 2.6.0 Extensions, Report LA-UR-08-2216, Los Alamos National Laboratory, April 11, 2008.
8. MCNP4C – Monte Carlo N-Particle Transport Code System, Los Alamos National Laboratory, July 2000.
9. Hendricks J.S., McKinney G.W., Waters L.S., Roberts T.L., Egeldorf H.W., Finch J.P., Trellue

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ОБЪЕКТАХ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

- H.R., Pitcher E.J., Mayo D.R., Swinhoe M.T., Tobin S.J., Durkee J.W., Gallmeier F.X., David J.-C. MCNPX EXTENSIONS Version 2.5.0, LANL Report LA-UR-05-2675, Los Alamos, 2005.
10. Gudima K.K., Ososkov G.A., Toneev V.D. Model for Pre-Equilibrium Decay of Excited Nuclei. *Soviet Journal of Nuclear Physics*, 1975, v. 21, p. 138.
11. Bertini H.W. Low-Energy Intranuclear Cascade Calculation. *Physical Review*, 1963, v. 131, pp. 1801–1821.
12. Bertini H.W. Intranuclear Cascade Calculation of the Secondary Nucleon Spectra from Nucleon-Nucleus, Interactions in the Energy Range 340 to 2900 MeV and Comparison with Experiment. *Physical Review*, 1969, v. 188, pp. 1711–1730.
13. Amelin N. Physics and Algorithms of the Hadronic Monte-Carlo Event Generators. Notes for a Developer, CERN/IT/ASD Report CERN/IT/99/6, Geneva, Switzerland and JINR/LHE, Dubna, Russia; Geant4 User's Documents, Physics Reference Manual, 1998.
14. Fong P. Statistical Theory of Nuclear Fission, Gordon and Breach Science Publishers, New York, 1969.
15. Chandler K.L., Armstrong T.W. Oak Ridge National Laboratory Report ORNL-TM-4744, 1972.
16. Dresner L. EVAP, A Fortran Program for Calculation the Evaporation of Various Particles from Excited Compound Nuclei, Oak Ridge National Laboratory, ORNL-TM-196, 1962.
17. Junghans A.R., de Jong M., Clerc H.-G., Ignatyuk A.V., Kudyaev G.A., Schmidt K.-H., Projectile-Fragment yields as a Probe for the Collective Enhancement in the Nuclear Level Density. *Nuclear Physics A*, 1998, v. 629, p. 635.
18. Mashnik S.G., Gudima K.K., Sierk A.J., Baznat M.I., Mokhov N.V. CEM03.01 User Manual, LANL Report LA-UR-05-7321, Los Alamos, 2005.
19. Natalenko A.A., Konobeyev A.Yu., Stankovskiy A.Yu., Mashnik S.G. High Energy Activation Data Library (HEAD-2009), Los Alamos National Laboratory Report, LA-UR-10-01397, 2010.
20. Korovin Yu.A., Natalenko A.A., Pil'nov G.B., Konobeyev A.Yu., Stankovskiy A.Yu., Tihonenko A.V. Biblioteka protonnyh aktivatsionnyh yadernyh dannyyh HEPAD-2008. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2009, no. 3, pp. 97–105 (in Russian).
21. Chadwick M.B., Hughes H.G., Little R.C., Pitcher E.J., Young P.G. Physics Models and Nuclear Data Evaluations for Enhanced Monte Carlo Transport, LANL Report LA-UR-00-3601, Los Alamos National Laboratory, 2000.

Author

Frolova Tatiana Aleksandrovna, PhD student
E-mail: frolova_ta@inbox.ru