

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОРОВ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ВУЗЕ

Д.И. Юрков*, **, В.И. Микеров*, **, Е.В. Рябева*, В.А. Идалов*, Р.Ф. Ибрагимов*, И.В. Урупа*

* *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
115409, Москва, Каширское шоссе, 31*
** *ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова
115304, Москва, Луганская ул., 9*



Рассмотрен комплекс организационно-технических мероприятий по безопасной эксплуатации портативных нейтронных генераторов в условиях работы высшего учебного заведения. Выполнено математическое моделирование дозовой нагрузки нейтронного излучения генератора быстрых нейтронов в помещениях постоянного и временного пребывания персонала и населения с помощью программного комплекса GEANT4. Реализованы разработка и создание специальной биологической защиты, контроль дозовых нагрузок с помощью современной дозиметрической аппаратуры, дистанционное управление выходом нейтронов генератора быстрых нейтронов, а также ограничение выхода нейтронов и времени работы нейтронного генератора, предотвращение доступа в помещения с работающими генераторами, контроль значений дозовой нагрузки с использованием специальных технических средств (дозиметры, радиометры и т.д.). Показано, что при созданной биологической защите и выходе генератора быстрых нейтронов до $5 \cdot 10^6$ н/с мощность эквивалентной дозы в помещениях постоянного пребывания персонала не превышает 0,3 мкЗв/ч, что на порядок ниже установленного в вузе ограничения по мощности дозы – 3 мкЗв/ч.

Ключевые слова: нейтронный генератор, математическое моделирование, GEANT4, быстрые нейтроны, мощность дозы.

ВВЕДЕНИЕ

Вузовская подготовка будущего специалиста к работе с источниками ионизирующих излучений (ИИ) должна обеспечивать его совокупностью знаний и практических навыков, позволяющих ему в своей профессиональной деятельности использовать как сами источники, так и устройства на их основе, а также участвовать в разработке подобных устройств. Такая подготовка невозможна без практического ознакомления с устройством и работой источников ИИ, а также правилами их эксплуатации.

Источники ИИ могут применяться в учебном процессе только при условии обеспечения полной радиационной безопасности всех лиц, находящихся на территории вуза. На площадках НИЯУ МИФИ установлены нормативы по предельно допустимым

© *Д.И. Юрков, В.И. Микеров, Е.В. Рябева, В.А. Идалов,
Р.Ф. Ибрагимов, И.В. Урупа, 2020*

дозам, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1

Контрольные уровни радиационного воздействия на площадках НИЯУ МИФИ

Величина допустимой дозовой нагрузки за один год			Допустимые значения мощности эквивалентной дозы
Персонал группы «А»	Персонал группы «Б» и население	Студенты (при выполнении лабораторных работ)	Рабочие места
5 мЗв	1 мЗв	0,5 мЗв	3 мкЗв/ч

В данной работе основным критерием, по которому оценивалось качество изготовленной применяемой радиационной защиты, являлось непревышение контрольных уровней радиационного воздействия.

В действующих лабораторных практикумах различных вузов обычно используются изотопные источники гамма-излучения типа ОСГИ (образцовые спектрометрические гамма-источники) либо изотопные источники нейтронов [1, 2]. В то же время в установках, применяемых в исследовательских лабораториях, производственных или полевых условиях, часто используются генераторы нейтронного и рентгеновского излучений. Среди источников данного типа генераторы быстрых нейтронов представляют наибольшую радиационную опасность, что обусловлено более высокой проникающей способностью быстрых нейтронов по сравнению с рентгеновским излучением.

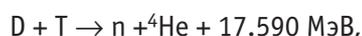
Ведущие университеты мира, занимающиеся подготовкой инженеров и исследователей для работы в области ядерной физики и технологии, используют нейтронные генераторы как в лабораторной практике, так и в исследовательских целях. Например, нейтронные генераторы используются в университетах Массачусетса [3], Стэнфорда [4], Беркли [5], Киото [6] и ряда других [7 – 16], студенты которых знакомятся с теорией и практикой их использования в рамках спецкурсов [17]. Как правило, используются компактные высокоэффективные источники нейтронов производства компаний Thermo Fisher Inc., Thermo Scientific, Sodern или установки на базе имеющихся ускорителей.

На кафедре № 24 «Прикладная ядерная физика» НИЯУ МИФИ созданы уникальные установки на базе нейтронных генераторов, которые активно используются как в учебном процессе, так и в научных исследованиях. Установки созданы на базе импульсных нейтронных генераторов ИНГ-07Т, ИНГ-27, ИНГ-103 и аппаратуры импульсного нейтронного каротажа АИНК-43-50 [18]. Использование этих установок потребовало целого ряда организационно-технических мероприятий, направленных на обеспечение безопасных условий проведения работ и на соблюдение требований к уровню радиационного воздействия на площадках вуза.

НАЗНАЧЕНИЕ ПОРТАТИВНЫХ НЕЙТРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ, ПРИНЦИП ИХ РАБОТЫ, БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА И ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ

На кафедре № 24 импульсные нейтронные генераторы (ИНГ) и аппаратура на их основе используются как в учебном процессе, так и в научных исследованиях.

Физический принцип генерации нейтронов в портативных нейтронных генераторах основан на ядерных реакциях



которые обеспечивают получение нейтронов с энергиями около 2,5 и 14,1 МэВ соответственно.

ИНГ – это миниатюрный ускоритель заряженных частиц (дейтронов), бомбардирующих мишень, насыщенную тритием или дейтерием. В результате указанных реакций из мишени генератора может быть получен выход нейтронов со значениями порядка 10^7 н/с при значениях ускоряющего напряжения около 100 кВ.

Работа с ИНГ на кафедре осуществляется исключительно с использованием биологической защиты. Принцип организации защиты ИНГ показан на примере защиты для генератора ИНГ-07Т. Она представляет собой закрытый со всех сторон контейнер с толщиной стенок 40 см, из которых наружные 10 см выполнены из борированного полиэтилена, а 30 см – из парафина и полиэтилена (рис. 1).

Биологическая защита ИНГ в других установках осуществлялась аналогичным образом.

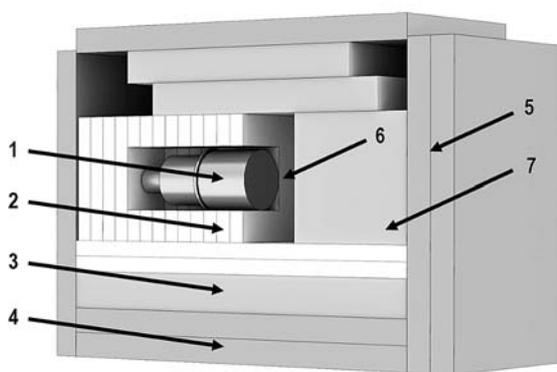


Рис. 1. Устройство биологической защиты ИНГ-07Т: 1 – ИНГ; 2 – полиэтилен; 3 – парафин; 4 – борированный полиэтилен; 5 – сдвигаемая плита из борированного полиэтилена; 6 – полость для облучаемых образцов; 7 – заглушка из парафина

Включение в работу любого из генераторов возможно только из соседнего помещения – пультовой. Во время включения генератора двери помещения, в котором он установлен, автоматически блокируются, и пока генератор работает доступ в помещение невозможен. Кроме того, на время работы генератора в соседних с генератором помещениях и коридоре включается светозвуковая сигнализация.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОВНЕЙ МОЩНОСТИ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ДОЗЫ

Для расчета мощности эквивалентной дозы (МЭД) использовался пакет GEANT4.10.4 и упрощенная геометрия помещений. Генераторы 14 МэВ нейтронов рассматривались как точечный изотропный источник нейтронов с энергией 14 МэВ, помещенный в центр биологической защиты.

В расчете учитывались дозы от нейтронного излучения генераторов и вклад от сопутствующих гамма- и рентгеновского излучений.

Пространство, не содержащее конструктивных элементов (стены, потолки, двери и т.п.), было заполнено «виртуальными» кубическими регистрирующими элементами из материала окружающей среды (т.е. воздуха). Для каждого элемента строилась энергетическая гистограмма для потока гамма и нейтронов сквозь поверхность «регистратора», а затем рассчитывалась эквивалентная доза для биологического фантома с использованием коэффициентов из НРБ-99 (ОСПОРБ) [19].

Результаты расчета МЭД представлялись в виде двумерных карт распределения мощности эквивалентной дозы по пространственным разрезам, расположение которых соответствует границам обитаемых зон соседних помещений.

Контрольные точки (КТ) и карта распределения мощности эквивалентной дозы, создаваемой при работе генератора нейтронов ИНГ-07Т, представлены на рис. 2. На шкале уровней МЭД отмечено среднее фоновое значение мощности дозы на площадках НИЯУ МИФИ 0,2 мкЗв/ч. Область на рисунке с пометкой «Улица» предполагает нахождение там людей только из категории «Население».

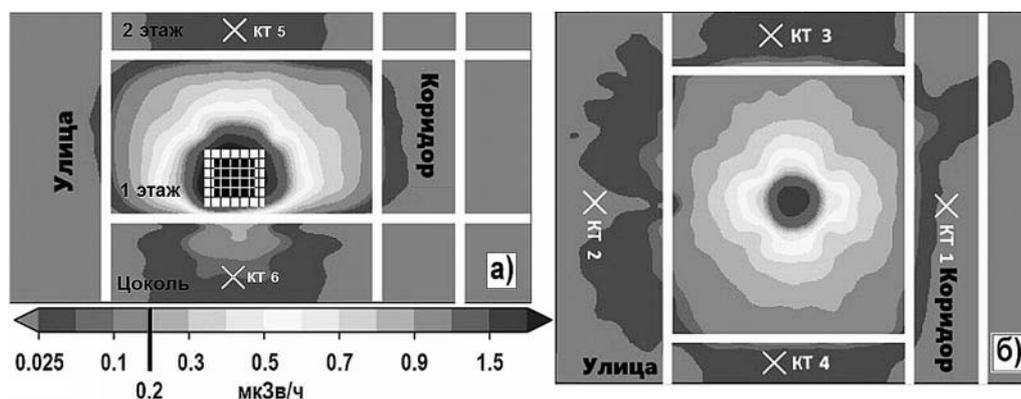


Рис. 2. Контрольные точки (КТ) и карты эквивалентностей МЭД в помещении с работающим ИНГ-07Т: а) – для плоскости вертикального разреза, проходящего через генератор и его защиту (вид сбоку, со стороны смежного помещения); б) – для горизонтальной плоскости разреза 1,5 м от пола помещения первого этажа (вид сверху)

Представленные результаты показывают, что для генератора нейтронов, расположенного в описанной выше биологической защите и работающего при выходе $5 \cdot 10^6$ н/с, мощность эквивалентной дозы излучения не превышает фоновое значение в прилегающих помещениях. Установленное предельное значение мощности эквивалентной дозы в помещениях постоянного пребывания персонала в 3 мкЗв/ч достигается лишь в помещении, где работает ИНГ. Согласно требованиям, установленным СанПиН 2.6.1.2802-10, во время работы генератора в этом помещении не должны находиться сотрудники или студенты, а управление генератором должно осуществляться дистанционно из соседнего помещения – специально оборудованной пультовой.

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ДОЗЫ (МЭД)

Измерение МЭД от ИНГ-07Т

Измерение МЭД, создаваемой генератором ИНГ-07Т при выходе быстрых нейтронов $5 \cdot 10^6$ н/с, производилось в контрольных точках, отмеченных на картах (см. рис. 2).

Таблица 2

Результаты измерений мощности эквивалентной дозы в контрольных точках с использованием дозиметра-радиометра МКС-АТ1117М

Контрольная точка	МЭД, мкЗв/ч
КТ-1	0.19 ± 0.04
КТ-2	0
КТ-3	0.14 ± 0.03
КТ-4	0.13 ± 0.03
КТ-5	0.20 ± 0.05
КТ-6	0.19 ± 0.05

Для замеров использовался многофункциональный дозиметр-радиометр

МКС-АТ1117М производства УП «АТОМТЕХ» [20]. Приборная погрешность дозиметра-радиометра составляет 25% при времени измерения 60 с. Результаты измерений представлены в табл. 2.

Результаты измерений мощности дозы (см. табл. 2) в пределах погрешности измерений согласуются с результатами расчета МЭД, показанными на рис. 2. Максимальная МЭД измерена в КТ-5 и не превышает 0,3 мкЗв/ч. Значения МЭД во всех точках не превышают контрольного уровня 3 мкЗв/ч, установленного в НИЯУ МИФИ для помещений постоянного пребывания персонала.

Измерения МЭД для других установок

Для определения возможного совокупного времени работы всех генераторов в контрольных точках (см. рис. 2) измерения уровней мощностей эквивалентных доз проводились также специалистами Роспотребнадзора. Эти измерения являлись необходимой частью процедуры получения санитарно-эпидемиологического заключения для разрешения работ с генераторами ионизирующего излучения в помещениях кафедры №24 НИЯУ МИФИ.

В таблице 3 приводятся режимы работы генерирующих установок, при которых измерялись мощности доз в контрольных точках.

Таблица 3

Режимы работы генерирующих установок

Установка	Режим работы
Импульсный нейтронный генератор ИНГ-07Т	Выход нейтронов из мишени генератора $\leq 5 \cdot 10^6$ нейтр/с
Установка нейтронного каротажа АИНК-43-50	Выход нейтронов из мишени генератора $\leq 5 \cdot 10^6$ нейтр/с
Импульсный нейтронный генератор ИНГ-27	Выход нейтронов из мишени генератора $\leq 1 \cdot 10^5$ нейтр/с
Импульсный нейтронный генератор ИНГ-103	Выход нейтронов из мишени генератора $\leq 1 \cdot 10^5$ нейтр/с (импульс длительностью 10 нс один раз в 5 минут при потоке нейтронов до 10^8 нейтронов за импульс)

Результаты измерений для ИНГ-07Т, выполненные сотрудниками кафедры № 24, в пределах погрешностей согласуются с результатами измерений СЭЗ Роспотребнадзора.

Согласно санитарно-эпидемиологическому заключению №77 МУ 02 000 М 000089 09 17 от 29.09.2017, генерирующие установки, описанные в данной статье, при указанных потоках нейтронов соответствуют государственным санитарно-эпидемиологическим правилам и нормативам и могут использоваться для учебно-образовательной и научно-исследовательской деятельности кафедры №24 НИЯУ МИФИ.

Измеренные значения мощности эквивалентной дозы, зафиксированные во время работы нейтронных генераторов, находящихся в распоряжении кафедры №24 НИЯУ МИФИ, совпадают со значениями, полученными с помощью моделирования в среде GEANT4, и не превышают значений, предусмотренных для помещений постоянного пребывания персонала. Эти значения также не превышают установленного в НИЯУ МИФИ контрольного уровня 3 мкЗв/ч.

ОЦЕНКА ГОДОВОЙ ДОЗОВОЙ НАГРУЗКИ И ОГРАНИЧЕНИЕ НА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ РАБОТЫ УСТАНОВОК

Результаты измерения мощности дозы позволяют получить значения продолжительности работы установок с включенным генератором при условии соблюдения требований

по ограничению годовых дозовых нагрузок.

Предельное значение мощности эквивалентной дозы на рабочем месте персонала категории «А» составляет 2 мкЗв/ч. При восьмичасовом рабочем дне с учетом месячного отпуска интегральное значение эквивалентной дозы, полученной сотрудником в течение года, может составлять 5 мЗв. Для сотрудников, относящихся к категории «Б» (к ним относятся и студенты) значение годовой дозы составляет 1 мЗв. Измерения показали, что работа генераторов ионизирующих излучений при наличии биологической защиты приводит к значению мощности эквивалентной дозы на рабочих местах персонала категории «А» не более 0,3 мкЗв/ч (при предельном значении в 2 мкЗв/ч).

Фактическая потребность в продолжительности работы установок с включенными нейтронными генераторами позволила ограничить максимальное значение годовой дозы на рабочих местах персонала категории «А» значением 0,1 мЗв. Это означает, что при режимах работы установок, указанных в табл. 3, каждая из них должна работать в год не более 80-ти часов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Безопасная эксплуатация портативных нейтронных генераторов на кафедре №24 НИЯУ МИФИ в настоящее время обеспечивается комплексом организационно-технических мероприятий:

- ограничением выхода нейтронов и времени работы нейтронного генератора;
- разработкой и созданием специальной биологической защиты;
- предотвращением доступа в помещения с работающими генераторами;
- контролем значений дозовой нагрузки с использованием специальных технических средств (дозиметры, радиометры и т.д.).

Проведенный кафедрой комплекс работ обеспечил получение положительного санитарно-эпидемиологического заключения о возможности использования генераторов ионизирующих излучений в помещениях кафедры.

Это заключение позволило повысить качество учебного процесса за счет включения в него лабораторных работ с использованием современных установок, дало возможность внедрения этих установок в научно-исследовательские работы, проводимые на кафедре в интересах предприятий атомной промышленности.

Литература

1. Лаборатория общего и специального практикума НИИЯФ МГУ им. М.В. Ломоносова. Электронный ресурс: <http://prac-gw.sinp.msu.ru/lsp.htm> (дата обращения 10.07.2020).
2. *Нестеров В.Н., Данейкин Ю.В., Беденко С.В.* Лабораторный практикум по ядерной физике. // Томский политехнический университет. Электронный ресурс: http://portal.tpu.ru:7777/departments/otdel/publish/izdaniya_razrabotanye_v_ramkah_IOP/Tab1/lab_pr_po_yad_fiz_zac.pdf (дата обращения 10.07.2020).
3. Сайт Массачусетского технологического института (MIT). Электронный ресурс: cstar.mit.edu/vault.php (дата обращения 10.07.2020).
4. Stanford University, Office of Technology Licensing. Электронный ресурс: http://techfinder.stanford.edu/technologies/S15-084_piezoelectric-neutron-generator (дата обращения 10.07.2020).
5. *Voyles A.S., Basunia M.S., Batchelder J.C., Bauer J.D., Becker T.A. и др.* Measurement of the Zn-64, Ti-47 (n,p) cross sections using a DD neutron generator for medical isotope studies. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 410. – 2017. – PP. 230-239.
6. *Pyeon Cheol Ho, Yamanaka M., Kim Song-Hyun, Vu Thanh-Mai и др.* Benchmarks of subcriticality in accelerator-driven system at Kyoto University Critical Assembly // Nuclear Engineering and Technology. – 2017. – Vol. 49. – PP. 1234-1239.
7. *Montgomery M.T., Yoho M.D., Biegalski S.R., Landsberger S., Welch L.* A 14 MeV neutron

- irradiation facility with an automated fast cyclic pneumatic. *J Radioanal Nucl Chem.* – 2016. – Vol. 309. – PP. 101-106.
8. *Kicka L., Machrafi R., Miller A.* Study of neutron fields around an intense neutron generator // *Applied Radiation and Isotopes* – 2017. – Vol. 130. – PP. 276-279.
9. *Williams J., Chester A., Domingo T., Rizwan U., Starosta K., Voss P.* Neutron generator facility at SFU: GEANT4 dose rate predictions and verification // *Radiation Protection Dosimetry.* – 2016. – Vol. 171. – No. 3. – PP. 313-325.
10. *Srinivasan P., Priya S., Patel T., Gopalakrishnan R.K., Sharma D.N.* Assessment of radiation shield integrity of DD/DT fusion neutron generator facilities by Monte Carlo and experimental methods // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 342. – 2015. – PP. 125-132.
11. *Li Xiang-Jong, Cheng Dao-wen, Liu Lin-mao.* Neutron radiation dose calculations from composite neutron shield of the on-line coal analyzer. // *J Radioanal Nucl Chem.* – 2016. – Vol. 308. – PP. 425-430.
12. *Metwally Walid A., Taquatqa Osama A., Ballaith Mohammed M., Chen Allan X., Piestrup Melvin A.* Neutron and photon dose mapping of a DD neutron generator. // *Radiation Protection Dosimetry.* – 2017. – Vol. 176. – No. 3. – PP. 258-263.
13. *Sharma Manish K., Alajo Ayodeji B., Liu Xin.* MCNP modeling of a neutron generator and its shielding at Missouri University of Science and Technology. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 767. – 2014. – PP. 126-134.
14. *Sagedhi H., Amrollahi R., Zare M., Fazelpour S.* High efficiency focus neutron generator // *Plasma Phys. Control Fusion.* – 2017. – Vol. 59. – PP. 1-7.
15. *Milad Seyed, Shirani Babak.* Improvement of the radiographic method for measurements of effective energy of pulsed X-ray emission from a PF device for different anode's insert materials. // *Applied Radiation and Isotopes.* – 2018. – Vol. 136. – PP. 21-26.
16. *Woo Hyun-Jong, Chung Kyu-Sun, Choi Yong-Sup, Han Chi Young и др.* Optimization of Hanyang University Plasma Focus Device as a Neutron Source. // *Japanese Journal of Applied Physics.* – 2004. – Vol. 43. – No. 10. – PP. 7271-7272.
17. A Brief History of Pulsed Neutron Generators by Kevin Fischer. Электронный ресурс: <http://large.stanford.edu/courses/2015/ph241/fischer2/> (дата обращения 10.07.2020).
18. ФГУП ВНИИА им. Л.Н. Духова официальный сайт. Электронный ресурс: <http://test.vniia.ru/ng/nauka.html> (дата обращения 10.07.2020).
19. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Электронный ресурс: <http://docs.cntd.ru/document/902170553/> (дата обращения 10.07.2020).
20. УП «АТОМТЕХ» официальный сайт. Электронный ресурс: <http://atomtex.com/ru/dozimetry-dozimetry-neutronnye/dozimetr-radiometr-mks-at1117m> (дата обращения 10.07.2020).

Поступила в редакцию 17.07.2020 г.

Авторы

Юрков Дмитрий Игоревич, доцент, к.т.н.

E-mail: dmitry_yurkov@mail.ru

Микеров Виталий Иванович, профессор, д.ф.-м.н.

E-mail: vmikerov250846@yandex.ru

Рябева Елена Васильевна, доцент, к.ф.-м.н.

E-mail: eryabeva@yandex.ru

Идалов Владимир Александрович, ассистент

E-mail: VAIdalov@mephi.ru

Ибрагимов Ренат Фаридович, инженер, ассистент

E-mail: RFIbragimov@mephi.ru

Урупа Илья Викторович инженер, аспирант

E-mail: IVUrupa@mephi.ru

UDC 539.1 378.165.15

ENSURING SAFE OPERATION OF UNIVERSITY NEUTRON GENERATORS

Yurkov D.I. *, **, Mikerov V.I. *, **, Ryabeva E.V. *, Idalov V.A. *, Ibragimov R.F. *, Urupa I.V. *

* National Research Nuclear University «MEPhI»

31 Kashirskoe Hwy, 115409 Moscow, Russia

** Federal State Unitary Enterprise Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA)

9 Luganskaya Str., 115304 Moscow, Russia

ABSTRACT

A package of organizational and engineering arrangements has been considered to ensure safe operation of portable neutron generators in a university environment. The dose rate from the fast neutron generator's neutron radiation in rooms permanently or temporarily occupied by personnel or the public was mathematically simulated using the GEANT4 code. Dedicated biological shielding has been developed and built, and measures have been put in place for the radiation dose monitoring using state-of-the-art health physics equipment and for remote control of the fast neutron generator's neutron yield, as well as to limit the neutron yield and the neutron generator operating time, to prevent access into rooms with operating generators, and to monitor the radiation dose values using special-purpose devices (dosimeters, radiometers, etc.).

It has been shown that the biological shielding built and the fast neutron generator's yield of up to $5 \cdot 10^6$ n/s provide for the equivalent dose rate in permanently occupied rooms not exceeding $0.3 \mu\text{Sv/h}$, which is an order of magnitude as low as the university dose rate limit of $3 \mu\text{Sv/h}$.

Key words: neutron generator, mathematical simulation, GEANT4, fast neutrons, dose rate.

REFERENCES:

1. Laboratory of General and Special Practices SINP MSU n.a. M.V. Lomonosov. Available at: <http://prac-gw.sinp.msu.ru/lsp.htm> (accessed Jul 10, 2020) (in Russian).
2. Nesterov V.N., Daneykin Yu.V., Bedenko S.V. Laboratory Workshop on Nuclear Physics. Tomsk Polytechnic University. Available at: http://portal.tpu.ru:7777/departments/otdel/publish/izdaniya_razrabotanye_v_ramkah_IOP/Tab1/lab_pr_po_yad_fiz_zac.pdf (accessed Jul 10, 2020) (in Russian).
3. MIT website. Available at: cstar.mit.edu/vault.php (accessed Jul 10, 2020).
4. Stanford University, Office of Technology Licensing Available at: http://techfinder.stanford.edu/technologies/S15-084_piezoelectric-neutron-generator (accessed Jul 10, 2020).
5. Voyles A.S., Basunia M.S., Batchelder J.C., Bauer J.D., Becker T.A. et al. Measurement of the Zn-64, Ti-47(n,p) cross sections using a DD neutron generator for medical isotope studies. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* 410, 2017, pp. 230-239.
6. Pyeon Cheol Ho, Yamanaka M., Kim Song-Hyun, Vu Thanh-Mai et al. Benchmarks of subcriticality in accelerator-driven system at Kyoto University Critical Assembly. *Nuclear Engineering and Technology*. 2017, v. 49, pp. 1234-1239.
7. Montgomery M.T., Yoho M.D., Biegalski S.R., Landsberger S., Welch L. A 14 MeV neutron irradiation facility with an automated fast cyclic pneumatic. *J Radioanal Nucl Chem*. 2016, v. 309, pp. 101-106.
8. Kicka L., Machrafi R., Miller A. Study of neutron fields around an intense neutron generator. *Applied Radiation and Isotopes*. 2017, v. 130, pp. 276-279.

9. Williams J., Chester A., Domingo T., Rizwan U., Starosta K., Voss P. Neutron generator facility at SFU: GEANT4 dose rate predictions and verification. *Radiation Protection Dosimetry*. 2016, v. 171, no. 3, pp. 313-325.
10. Srinivasan P., Priya S., Patel T., Gopalakrishnan R.K., Sharma D.N. Assessment of radiation shield integrity of DD/DT fusion neutron generator facilities by Monte Carlo and experimental methods. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 342*. 2015, pp. 125-132.
11. Li Xiang-Iong, Cheng Dao-wen, Liu Lin-mao. Neutron radiation dose calculations from composite neutron shield of the on-line coal analyzer. *J Radioanal Nucl Chem*. 2016, 308, pp. 425-430.
12. Metwally Walid A., Taquatqa Osama A., Ballaith Mohammed M., Chen Allan X., Piestrup Melvin A. Neutron and photon dose mapping of a DD neutron generator. *Radiation Protection Dosimetry*. 2017, v. 176, no. 3, pp. 258-263.
13. Sharma Manish K., Alajo Ayodeji B., Liu Xin. MCNP modeling of a neutron generator and its shielding at Missouri University of Science and Technology. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 767*, 2014, pp. 126-134.
14. Sagedhi H., Amrollahi R., Zare M., Fazelpour S. High efficiency focus neutron generator. *Plasma Phys. Control Fusion*. 2017, v. 59, pp. 1-7.
15. Milad Seyed, Shirani Babak. Improvement of the radiographic method for measurements of effective energy of pulsed X-ray emission from a PF device for different anode's insert materials. *Applied Radiation and Isotopes*. 2018, v. 136, pp. 21-26.
16. Woo Hyun-Jong, Chung Kyu-Sun, Choi Yong-Sup, Han Chi Young et al. Optimization of Hanyang University Plasma Focus Device as a Neutron Source. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2004, v. 43, no. 10, pp. 7271-7272.
17. A Brief History of Pulsed Neutron Generators by Kevin Fischer. Available at: <http://large.stanford.edu/courses/2015/ph241/fischer2/> (accessed Jul 10, 2020).
18. FSUE VNIIA. Available at: <http://test.vniia.ru/ng/nauka.html> (accessed Jul 10, 2020).
19. NRB-99/2009. Sanitary Rules and Regulations SanPiN 2.6.1.2523-09. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902170553/> (accessed Jul 10, 2020) (in Russian).
20. UP «ATOMTEX» website. Available at: <http://atomtex.com/ru/dozimetry-dozimetry-neytronnye/dozimetr-radiometr-mks-at1117m> (accessed Jul 10, 2020) (in Russian).

Authors

Yurkov Dmitriy Igorevich, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: dmitry_yurkov@mail.ru

Mikerov Vitaliy Ivanovich, Professor, Dr. Sci. (Phys.- Math.)

E-mail: vmikero250846@yandex.ru

Ryabeva Elena Vasilievna, Associate Professor, Dr. Sci. (Phys.- Math.)

E-mail: eryabeva@yandex.ru

Idalov Vladimir Alexandrovich, Assistant

E-mail: VAIdalov@mephi.ru

Ibragimov Renat Faridovich, Engineer, Assistant

E-mail: RFIbragimov@mephi.ru

Urupa Ilya Viktorovich, Engineer, PhD Student

E-mail: IVUrupa@mephi.ru