

P16-2008-42

Г. Н. Тимошенко, М. Парайпан, Б. В. Флорко, Л. Н. Зайцев

**ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ НУКЛОТРОНА  
ПРИ ЕГО МОДЕРНИЗАЦИИ ДЛЯ ПРОЕКТА NICA**

Направлено в оргкомитет XXI Всероссийской конференции  
по ускорителям заряженных частиц RUPAC-2008,  
Звенигород, 28 сентября — 3 октября 2008 г.

## Оценка радиационной защиты нуклотрона при его модернизации для проекта NICA

Представлены результаты расчета радиационной защиты нуклотрона при ускорении ядер урана до энергии 3,5 ГэВ/нуклон и равномерно распределенных по кольцу потерях пучка  $1 \cdot 10^8$  ядер/с. Расчеты выполнены с помощью программ FLUKA и GEANT4 для упрощенной модели ускорителя, размещенного внутри кольцевого туннеля синхрофазотрона в соответствии с требованиями норм радиационной безопасности. Радиационная обстановка вокруг модернизированного нуклотрона будет определяться многократно рассеянными в воздухе и грунте нейтронами утечки из защиты. Предложен вариант конструктивного решения верхней защиты туннеля с использованием элементов ярма магнита синхрофазотрона.

Работа выполнена в Лаборатории радиационной биологии ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2008

## Estimation of the Nuclotron Radiation Shielding Modernized for the NICA Project

The results of the Nuclotron radiation shielding calculations at the acceleration of uranium nuclei to energy 3.5 GeV/n and beam losses uniformly distributed along the accelerator ring of  $1 \cdot 10^8$  nuclei/s are presented. The calculations were carried out by the FLUKA and GEANT4 codes for the simplified model of the accelerator placed within the synchrophasotron tunnel in compliance with national standards on radiation protection. The neutrons escaped from the Nuclotron shielding and multiscattered in air and ground will form the radiation situation around the modernized Nuclotron. The variant of the Nuclotron shielding design with the use of synchrophasotron magnet element is proposed.

The investigation has been performed at the Laboratory of Radiation Biology, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2008

Необходимым условием реализации проекта NICA (Nuclotron-based Ion Collider facility) является создание радиационной защиты элементов ускорительного комплекса. Защита каждого элемента комплекса имеет свою специфику, тем не менее, радиационная обстановка при проектировании должна определяться для комплекса в целом при его работе в наиболее радиационно-опасном режиме. Основной задачей проектируемого комплекса будет работа на установку MPD (Mixed Phase Detector) в режиме ускорения ядер  $^{238}\text{U}$  до энергии 3,5 ГэВ/нуклон [1]. Предполагается, что при проектной светимости  $1 \cdot 10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  для выполнения научной программы коллайдер будет работать в указанном режиме до  $4 \cdot 10^3$  ч в год.

Основными источниками излучения, формирующими радиационную обстановку при работе ускорительного комплекса NICA, будут являться:

- прямолинейные промежутки кольца синхрофазотрона, внутри которого будет размещен бустер для ускорения ядер урана до энергии 0,45 ГэВ/нуклон;
- мишенная станция для обдирки пучка ядер урана;
- нуклотрон, расположенный в кабельном туннеле синхрофазотрона и осуществляющий ускорение ядер урана до энергии 3,5 ГэВ/нуклон;
- канал транспортировки ядер из нуклотрона в коллайдер;
- коллайдер в корпусе 205;
- ловушки пучка ядер урана в корпусе 205.

Наиболее радиационно-опасными источниками излучения из вышеперечисленных будут мишенная станция обдирки пучка и нуклотрон из-за больших величин возможных потерь пучка ядер.

В настоящей работе приведены результаты предварительного расчета верхней защиты туннеля модернизированного нуклотрона в соответствии с требованиями национальных санитарных правил ОСПОРБ-99 [2] и норм радиационной безопасности НРБ [3]. Специальной радиационной защиты нуклотрона не существует. Приемлемая радиационная обстановка при всех режимах работы нуклотрона обеспечивается в настоящее время в прилегающих к кольцу помещениях и вне пределов здания за счет размещения камеры ускорителя внутри кольцевого туннеля и частичной экранировки вторичного излучения магнитом и фундаментом синхрофазотрона, а также грунтом и строительными конструкциями здания. Радиационная защита нуклотрона была предусмотрена при его проектировании [4], однако не была реализована из-за того, что рабочие параметры ускорителя оказались значительно ниже проектных.

Основная проблема при проектировании верхней защиты туннеля модернизированного нуклотрона связана с корректным описанием протяжен-

ного источника вторичного излучения, формируемого при взаимодействии выбывших из процесса ускорения ядер  $^{238}\text{U}$  с деталями ускорителя. Расчет такого источника возможен при использовании ряда допущений по одной из универсальных транспортных программ Монте-Карло, моделирующей ядро-ядерные соударения при высоких энергиях (FLUKA [5], GEANT [6], RHITS [7], MARS [8], SHIELD [9]). В работе [10] представлены результаты сравнения расчетов двойных дифференциальных выходов нейтронов из толстой железной мишени, облучаемой ядрами  $^{238}\text{U}$ , по программам FLUKA, GEANT4 и SHIELD с данными эксперимента [11, 12]. Показано, что для расчета боковых защит предпочтительнее использование GEANT4, показавшей лучшее согласие с экспериментом в области больших углов вылета нейтронов из мишени.

Расчет защиты модернизированного нуклотрона проводился для режима ускорения ядер урана при следующих допущениях:

- 1) все потери пучка в нуклотроне происходят при максимальной энергии ядер;
- 2) потери равномерно распределены по кольцу нуклотрона;
- 3) все элементы конструкции ускорителя имитируются однородной протяженной мишенью;
- 4) угол падения выбывших из процесса ускорения ядер на внутреннюю поверхность протяженной мишени составляет  $17,5$  мрад ( $1^\circ$ ).

Камера нуклотрона моделировалась однородным медным кольцом диаметром  $39,7$  м с квадратным сечением (сторона внутренней полости —  $10$  см, внешняя сторона —  $20$  см). Погонная масса вещества элемента кольца нуклотрона примерно соответствует средней погонной массе всех деталей нуклотрона (камеры, системы охлаждения, магнитной оптики и др.)  $\sim 300$  кг. На рис. 1 показана геометрия расчета вторичного излучения из элемента кольца нуклотрона, генерируемого потерями пучка.

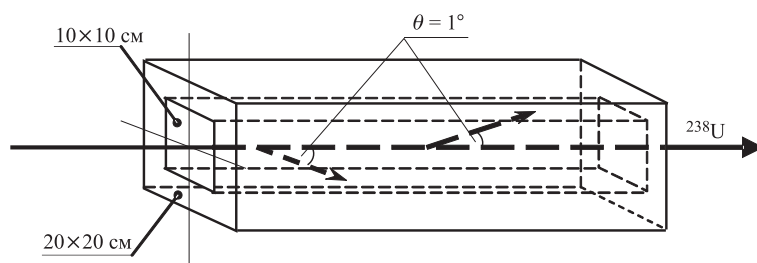


Рис. 1. Элемент кольца ускорителя, принятый в качестве модели при расчете вторичного излучения, обусловленного потерями ядер урана

В расчетах учитывались бетонный фундамент под магнитом синхрофазотрона, ядро магнита, стена корпуса синхрофазотрона с фундаментом и грунт.

На рис. 2 представлена задаваемая в расчетах упрощенная геометрия туннеля с элементами синхрофазотрона и здания.

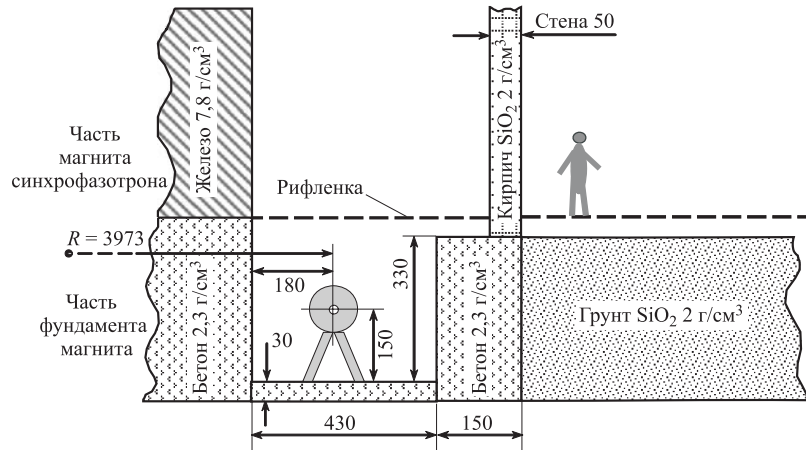


Рис. 2. Геометрия размещения нуклотрона в туннеле с учитываемыми в расчетах строительными конструкциями и оборудованием (размеры — в см)

Здание синхрофазотрона с большими оконными проемами и легкой крышей не служит защитой от проникающего излучения. Вторичные нейтроны, вылетающие из туннеля нуклотрона, свободно выходят в окружающую здание воздушную среду и, многократно рассеиваясь в воздухе, грунте и окружающих объектах, создают протяженное нейтронное поле вокруг здания ускорителя (эффект skyshine). Ближайшая граница территории площадки ЛВЭ (и санитарно-защитной зоны (СЗЗ) соответственно) находится на расстоянии примерно 100 м от центра нуклотрона. Согласно действующему законодательству, значение годовой эффективной дозы на территории вне пределов СЗЗ не может превысить 1 мЗв. Это ограничение является критическим для модернизированного нуклотрона и определяет требования к его защите.

Для прогнозирования радиационной обстановки на ускорительном комплексе без верхней защиты туннеля нуклотрона был выполнен расчет радиального распределения флюенса и эффективной дозы нейтронов skyshine. Геометрия расчета пространственного распределения нейтронов skyshine, реализованная во входном файле программы GEANT4, показана на рис. 3.

Так как свободный пробег высокоэнергетичных нейтронов в воздухе составляет сотни метров, то в расчетах учитывался слой воздуха радиусом 1500 м, а также слой грунта толщиной 0,5 м. Значения флюенса и эффективной дозы нейтронов усреднялись в концентрических слоях пространства высотой 1 м и шириной 3 м вокруг здания.

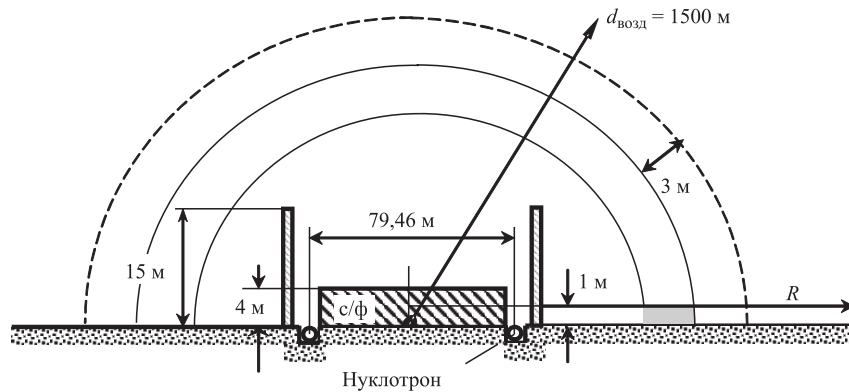


Рис. 3. Геометрия расчета радиального распределения флюенса и эффективной дозы нейтронов skyshine

Результаты расчета по программам FLUKA2003 и GEANT4 флюенса и эффективной дозы нейтронов skyshine при отсутствии верхней защиты туннеля нуклотрона приведены на рис. 4 и 5 (нормированы на 1 ядро урана с энергией 3,5 ГэВ/нуклон, потерянное в кольце нуклотрона). Расстояния отложены от центра нуклотрона.

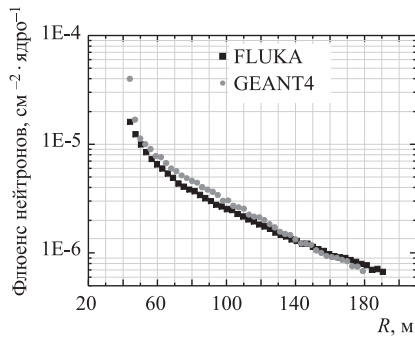


Рис. 4. Флюенс нейтронов skyshine при отсутствии верхней защиты нуклотрона

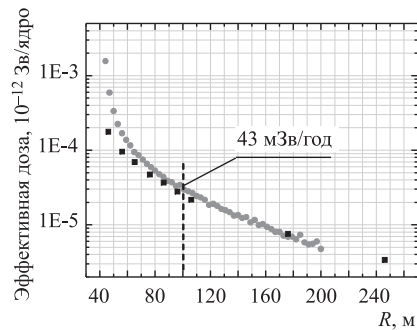


Рис. 5. Эффективная доза нейтронов skyshine при отсутствии верхней защиты нуклотрона

Эффективная доза определялась путем свертки спектров нейтронов с энергетической зависимостью коэффициентов перехода от единичного флюенса к эффективной дозе для изотропного поля излучения (до 20 МэВ по [3], от 20 до 1500 МэВ по [13]). Основными параметрами, определяющими годовую эффективную дозу нейтронов на границе СЗЗ, будут являться потери

пучка ядер в нуклотроне и длительность его работы в этом режиме. Можно предположить, что значение потерь пучка ядер составит несколько процентов. Это согласуется и со значениями потерь, принятыми при проектировании защиты синхротрона SIS100/300 в Дармштадте [14, 15]. Так, для туннеля синхротрона величина потерь пучка предполагалась равной 10% [14]. С учетом необходимой консервативности для нуклотрона было взято для оценок защиты значение потерь пучка  $1 \cdot 10^8$  ядер  $\cdot$  с $^{-1}$  (9%). При этом допущении в отсутствие защиты нуклотрона годовая эффективная доза на границе СЗЗ составит 43 мЗв, что недопустимо.

Были выполнены также расчеты пространственного распределения эффективной дозы нейтронов skyshine вокруг нуклотрона при наличии верхней защиты из обычного бетона ( $\rho = 2,3$  г/см $^2$ ) толщиной 2 и 3 м. Результаты представлены на рис. 6. При указанных выше потерях ядер урана годовая эффективная доза нейтронов на границе СЗЗ составит 0,29 мЗв при толщине верхней защиты 3 м и 2,75 мЗв — при толщине защиты 2 м. Нуклотрон будет являться только одним из источников излучения, к тому же, расстояние от коллайдера в корпусе 205 до границы СЗЗ еще меньше, чем от нуклотрона. Поэтому проектные значения потерь пучка в нуклотроне должны задаваться на уровне 4–5% с тем, чтобы при трехметровой верхней защите нуклотрона обеспечить соблюдение нормативных требований для всего комплекса NICA.

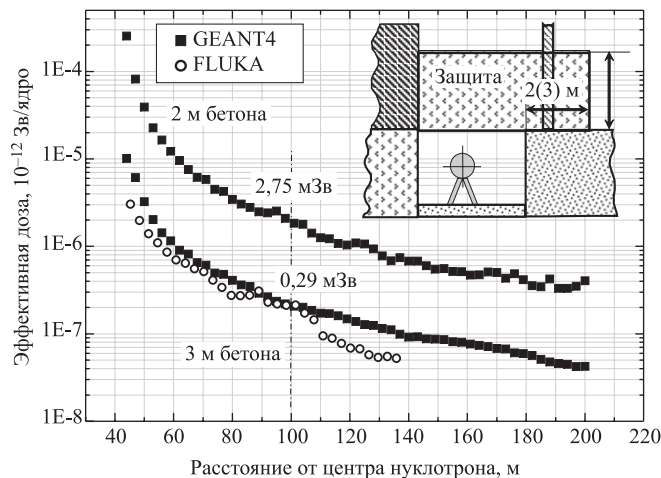


Рис. 6. Радиальное распределение эффективной дозы нейтронов skyshine при наличии верхней защиты нуклотрона из обычного бетона толщиной 2 и 3 м

На рис. 7 приведена кривая ослабления в защите флюенса высокоэнергетических нейтронов, генерируемых в камере нуклотрона за счет потерь ускоренного пучка ядер урана. Из-за сложного спектрально-углового распределе-

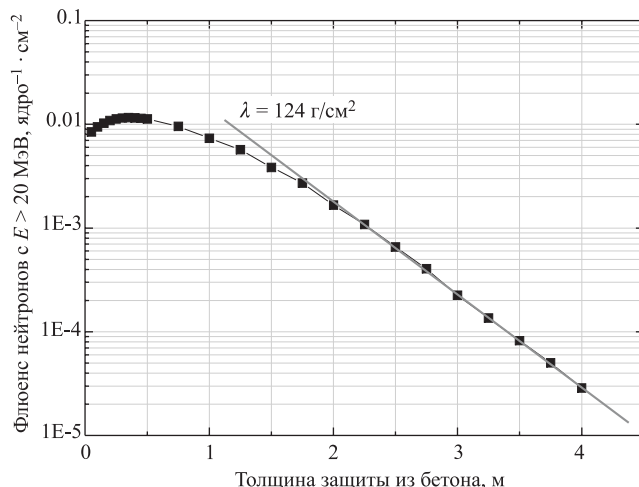


Рис. 7. Ослабление в бетоне верхней защиты флюенса нейтронов с энергией более 20 МэВ, обусловленных потерями пучка ядер урана в камере нуклотрона

ния вторичных нейтронов, падающих изнутри на защиту, экспоненциальный участок кривой начинает формироваться лишь на глубинах больше 2 м. Далее длина релаксации нейтронов составляет  $\sim 124 \text{ г}\cdot\text{см}^{-2}$ , что типично для ослабления в легком бетоне высокоэнергетичных нейтронов.

При конструировании защиты кольца нуклотрона следует учитывать следующий фактор. Вес защиты не должен создавать значимой дополнительной нагрузки на грунт под синхрофазотроном во избежание просадки элементов нуклотрона. В идеале ее конструкция должна быть такой, чтобы суммарное давление на грунт магнитов синхрофазотрона и защиты не изменилось. Фундамент здания синхрофазотрона также не может служить опорой для массивной защиты.

Вариант, удовлетворяющий вышесказанному, реализуем при использовании в качестве защиты кольца нуклотрона нижних балок магнитов синхрофазотрона (рис. 8). Внешние боковые балки магнитов при этом поворачиваются на  $90^\circ$ , а нижние балки магнитов надвигаются на туннель в виде консоли (фактически без опоры на фундамент здания). Немаловажен и тот факт, что использование части элементов синхрофазотрона для создания защиты нуклотрона существенно удешевит стоимость мероприятий, направленных на обеспечение радиационной безопасности проектируемого ускорительного комплекса.

Расчет по GEANT4 радиального распределения эффективной дозы нейтронов skyshine для варианта железной консольной защиты туннеля нукло-



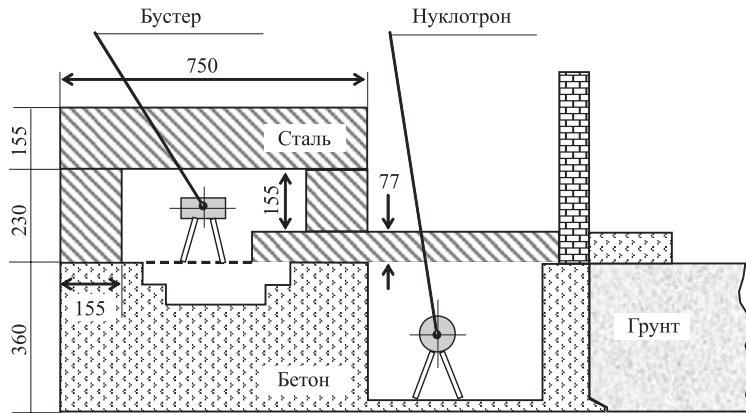


Рис. 8. Вариант консольной защиты туннеля нуклотрона с использованием нижней балки магнита синхрофазотрона

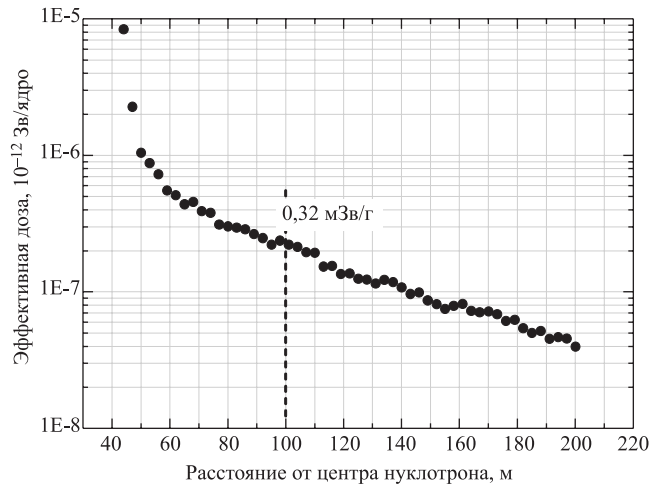


Рис. 9. Эффективная доза нейтронов skyshine для варианта железной консольной защиты нуклотрона

трона показал, что на расстоянии 100 м от центра нуклотрона годовая доза нейтронов составит при тех же условиях эксплуатации ускорителя 0,32 мЗв, т. е. практически столько же, сколько при бетонной защите нуклотрона толщиной 3 м (рис. 9).

Еще одним источником нейтронов skyshine будут являться четыре прямолинейных промежутка синхрофазотрона, внутри которого предполагается разместить бустер для ускорения ядер урана до энергии 450 МэВ/нуклон.

Длина каждого прямолинейного промежутка — 8 м при периметре ионопровода бустера 207 м. Предполагается, что эти промежутки будут закрыты сплошной бетонной защитой толщиной 1 м. Остальная часть бустера не нуждается в защите, поскольку ее роль выполняет ярмо магнита синхрофазотрона. Для оценки вклада в годовую дозу на границе санитарно-защитной зоны от нейтронов skyshine, появление которых обусловлено потерями пучка внутри прямолинейных промежутков бустера, был выполнен расчет радиального распределения эффективной дозы нейтронов при тех же условиях облучения камеры бустера, что и для нуклотрона, но при энергии ядер урана 500 МэВ/нуклон. Результаты расчета представлены на рис. 10.

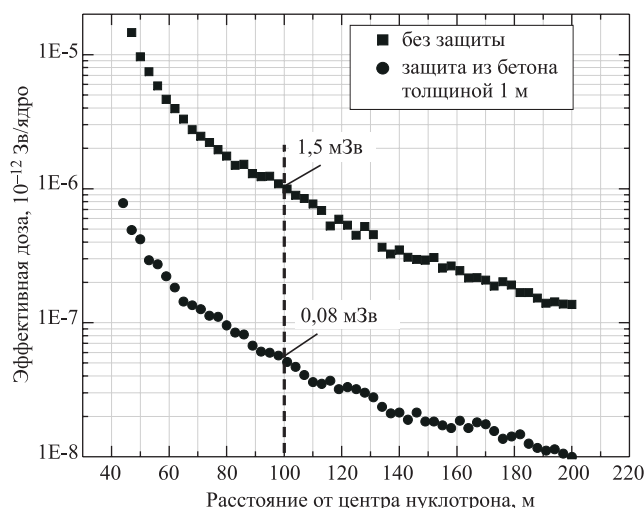


Рис. 10. Эффективная доза нейтронов skyshine при отсутствии защит прямолинейных промежутков бустера и с их защитой из обычного бетона толщиной 1 м

При наличии указанной защиты и потерях в бустере ядер урана с энергией 450 МэВ/н  $1 \cdot 10^8$  ядер  $\cdot$  с $^{-1}$  (3,6 %) вклад его нейтронов skyshine в годовую эффективную дозу в критической точке составит 0,08 мЗв.

Авторы выражают благодарность А. С. Сорину, Г. В. Трубникову, Н. Н. Агапову и А. Д. Коваленко за поддержку работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Toneev V. The NICA/MPD Project at JINR (Dubna) // Proceedings of Science (CPOD07) 057. JINR, Dubna, 2007.
2. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99. М.: НКП «АПРОХИМ», 2000.

3. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99): Гигиенические нормативы СП 2.6.1.758-99. М., Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экспертизы Минздрава России, 1999.
4. *Зайцев Л. Н., Решетников Г. П., Сырейщиков А. Е.* Препринт ОИЯИ 9-86-5. Дубна, 1986.
5. *Fasso A., Ferrari A., Sala P.R.* Electron-Photon Transport in FLUKA: Status and Prospective for Hadronic Applications // Proceedings of the Monte Carlo 2000 Conference / A. Kling, F. Barao, M. Nakagawa, L. Tavora, P. Vaz (Eds.), Lisbon, 23–26 October, 2000 Springer-Verlag, Berlin, 2001. P. 955.
6. *Brun R. et al.* GEANT User's Guide, CERN DD/EE/84-1, Geneva, 1984.
7. *Iwase H.* // J. of Nucl. Sci. and Tech. 2002. V. 39. P. 1142.
8. *Mokhov N. V., Striganov S. I., Van Ginneken A., Mashnik S. G., Sierk A. J., Ranft J.* MARS Code Developments // Proceedings of the Fourth Workshop on Simulating Accelerator Radiation Environments (SARE4), T. Gabriel (Ed.), Knoxville (TN, USA), 14–16 September, 1998. RNL, 1988. P. 87.
9. *Dementyev A. V., Sobolevsky N. M.* SHIELD — Universal Monte Carlo Hadron Transport Code: Scope and Applications // Radiation Measurements. 1999. V. 30. P. 553.
10. *Beskrovnaia L., Paraipan M., Sobolevsky N., Timoshenko G., Florko B.* Verification of Monte-Carlo Transport Codes FLUKA, GEANT and SHIELD for Radiation Protection Purposes at Relativistic Heavy Ion Accelerator. JINR Preprint E7-2008-40. Dubna, 2008.
11. *Yordanov O. et al.* Neutron Yields from 1 GeV/u  $^{238}\text{U}$  Beams on Fe Target // Nucl. Instr. Meth. B. 2005. V. 240. P. 863.
12. *Gunzert-Marx K., Radon T., Fehrenbacher G., Gutermuth F., Schardt D.* Double Differential Neutron Yields from Thick Targets Induced by Relativistic Carbon and Uranium Beams // Proceedings of Science (FNDA2006) 057, International Workshop on Fast Neutron Detectors. University of Cape Town, South Africa, April 3–6, 2006.
13. *Roesler S., Stevenson G.R.* deq99.f — A FLUKA User-Routine Converting Fluence into Effective Dose and Ambient Dose Equivalent, CERN-SC-2006-070-RP-TN. CERN, Geneva, 2006.
14. *Fehrenbacher G., Gutermuth F., Radon T.* Shielding of SIS100/300, Report GSI, FAIR-ACC-08, 2004.
15. *Mustafin E., Moritz G., Walter G., Latysheva I., Sobolevsky N.* Radiation Damage to the Elements of the Nuclotron-Type Dipole of SIS100 // Proceedings of EPAC 2004. Lucerne, Switzerland, 2005. P. 1408.

Получено 25 марта 2008 г.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 10.06.2008.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,75. Уч.-изд. л. 0,89. Тираж 230 экз. Заказ № 56200.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)