

*А. А. Балдин, В. И. Стегайлов, М. Парайпан, С. И. Тютюнников,
Е. В. Бармина, Г. А. Шафеев, А. В. Симакин*

Проект «Энергия + трансмутация»

В ЛФВЭ с 2016 г. ведутся работы в области использования релятивистских пучков для электроядерной технологии получения энергии за счет того, что с увеличением энергии пучка возрастают эффекты нейтронообразования. Однако проведенный цикл исследований на пучках дейтронов с энергией 1–8 ГэВ не показал увеличения эффективности энерговыхода. В связи с этим на пучках легких ядер на нуклотроне были проведены исследования по эффективности использования легких ядер ${}^2\text{D}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^{12}\text{C}$ для генерации энергии. На рис. 1 показана зависимость энерговыхода для легких ионов.

Выполнены исследования утечки нейтронов с установки «Квинта» на пучке протонов фазотрона ЛЯП ОИЯИ, которые однозначно продемонстрировали, что в размерах активной зоны $\varnothing 30$ см коэффициент утечки составляет около 85%. Это показывает целесообразность проведения исследований с ядерными системами большего радиуса ($R > 60$ см). В настоящее

время большая урановая мишень установлена на фазотроне ЛЯП. Были проведены расчеты коэффициента энергетического усиления большой урановой мишени (см. рис. 2 и 3).

Для безопасных экспериментальных исследований на пучке протонов фазотрона были проведены расчеты нейтронных полей как внутри большой урановой мишени, так и на ее боковой поверхности. На рис. 4 показаны дозовые и спектральные характеристики нейтронных полей, генерируемых протонами с энергией $E = 660$ МэВ и интенсивностью $I = 10^{11}$ с $^{-1}$.

В рамках проекта «Энергия + трансмутация» проведены совместные исследования с Институтом общей физики РАН (ИОФАН) по воздействию лазерного излучения на распад ${}^{137}\text{Cs}$, находящегося в коллоидном растворе Au (см. рис. 5). Обнаружено уменьшение выхода γ -излучения с энергией $E_\gamma = 660$ кэВ более чем на 10%. Значительное уменьшение интенсивности излучения ${}^{137}\text{Cs}$ свидетельствует об абсолютном

*А. А. Baldin, V. I. Stegailov, M. Paraipan, S. I. Tyutyunnikov,
E. V. Barmina, G. A. Shafeev, A. V. Simakin*

Project “Energy + Transmutation”

Since 2016, the Veksler and Baldin Laboratory of High Energy Physics has been working in the field of the application of relativistic beams for electro-nuclear energy production due to the fact that with the increase in beam energy the effects of neutron formations increase eventually. However, a cycle of studies on 1–8 GeV deuteron beams has not shown an increase in energy efficiency. In this regard, studies on beams of light nuclei at the Nuclotron on the efficiency of using light nuclei ${}^2\text{D}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^{12}\text{C}$ for energy generation were conducted. Figure 1 shows the dependence of the energy output for light ions.

Investigations of neutron leakage from the surface of the Quinta facility upon irradiation with a proton beam from the Phasotron of the JINR DLNP were conducted. These studies have indicated that in the core of $\varnothing 30$ cm the leakage rate is about 85%. This shows the feasibility of studying nuclear systems with a larger radius, $R > 60$ cm. Currently, a big uranium target is mounted at the DLNP

Phasotron. The energy gain of the big uranium target was calculated (see Figs. 2 and 3).

To conduct safe experimental studies on the proton beam of the Phasotron of the JINR DLNP, neutron fields were calculated both inside the big uranium target and on its side surface in order to select safe working conditions. Figure 4 shows the dose and spectral characteristics of neutron fields generated by protons with the energy of $E = 660$ MeV and the intensity of $I = 10^{11}$ s $^{-1}$.

Within the framework of the E&T project, joint research was conducted with the Institute of General Physics of the Russian Academy of Sciences (IOFAN) on the effect of laser radiation on the decay of ${}^{137}\text{Cs}$ in a colloidal Au solution (see Fig. 5). A more than 10% decrease of γ -radiation output with the energy $E_\gamma = 660$ keV was detected. A significant decrease in the radiation intensity of ${}^{137}\text{Cs}$ indicates the absolute decline in the number of ${}^{137}\text{Cs}$ atoms, which is the purpose of transmutation of nuclear waste. We study possible channels for changing the activity of

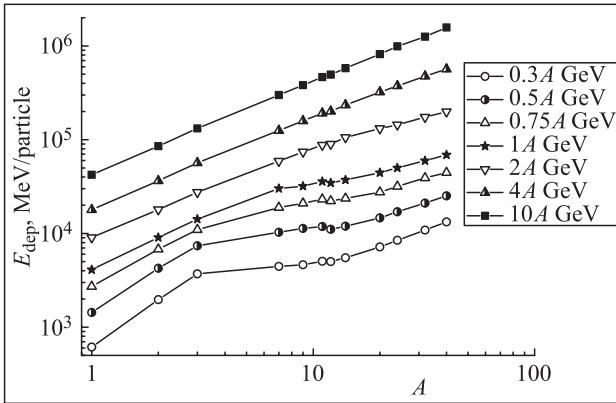


Рис. 1. Интегральное энерговыделение, приходящееся на один падающий ион пучка, в зависимости от массового числа налетающего иона

Fig. 1. Integral energy release per incident beam ion depending on the mass number of the incident ion

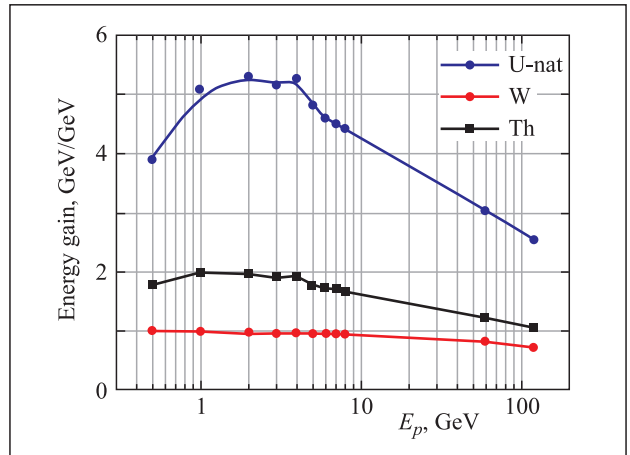


Рис. 2. Коэффициент энергетического усиления большой урановой мишени

Fig. 2. Energy gain in the big uranium target

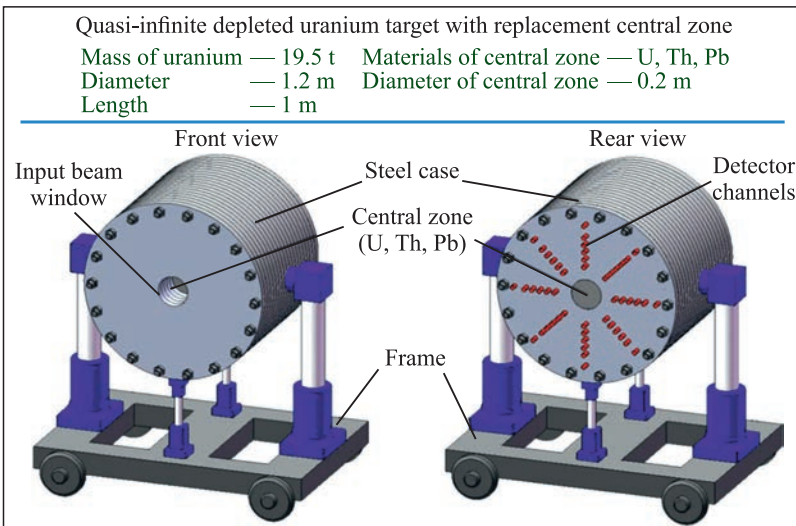


Рис. 3 Большая урановая мишень с $R = 60$ см

Fig. 3. Big uranium target, $R = 60$ cm

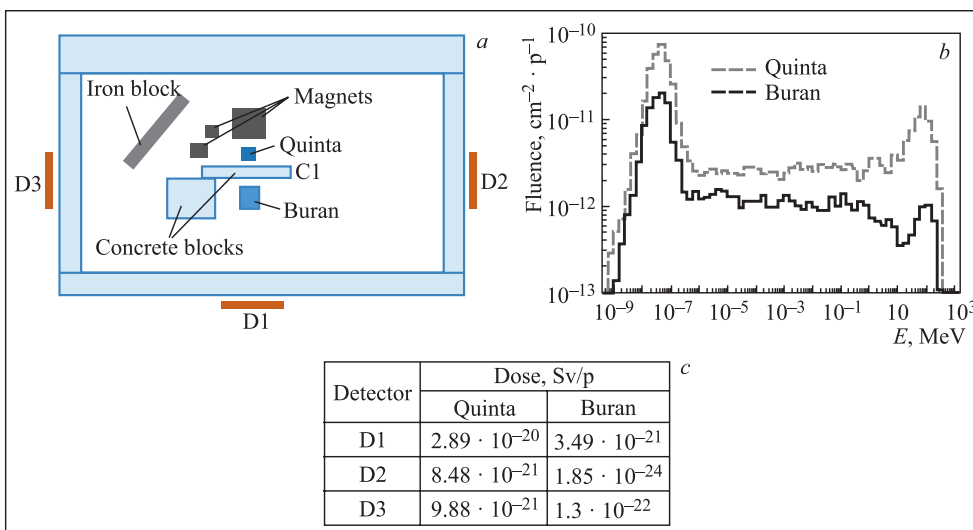


Рис. 4. a) Схема экспериментальной установки в ЛЯП; b) генерируемые нейтронные спектры на мишенях «Quinta» и «Buran», $E = 0,66$ ГэВ; c) таблица дозовых характеристик в местах измерения

Fig. 4. a) Layout of the experimental hall at DLNP; b) the neutron spectra at position D1 in the irradiation of targets “Quinta” and “Buran” with proton beam with an energy of 0.66 GeV; c) dose characteristics at measurement positions

уменьшении количества атомов ^{137}Cs , что является целью трансмутации ядерных отходов. Идет исследование возможных каналов изменения активности ^{137}Cs . Готовится эксперимент по измерению нейтронного излучения при лазерном облучении.

Рис. 5. Временное измерение активности водного раствора ^{137}Cs , выполненное при энергии $E = 662$ кэВ под действием лазерного облучения

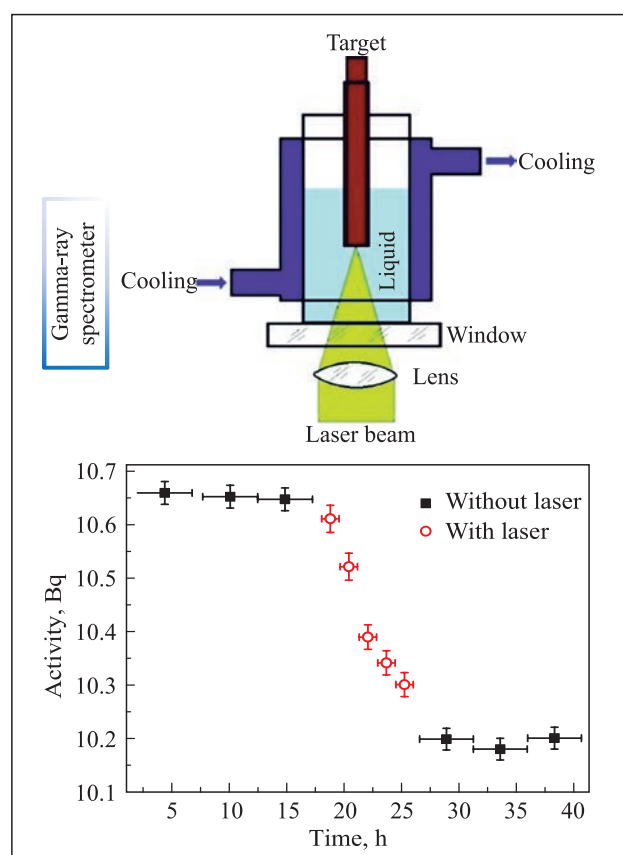


Fig. 5. The time variation of activity (in Becquerel units) of aqueous solution of ^{137}Cs at 662 keV. Solid squares — without laser irradiation, open circles — by laser irradiation

^{137}Cs . An experiment is being prepared for measurements of neutron radiation under laser influence.

To conduct structural studies of radiation damage to materials used for the manufacture of superconducting magnets of the NICA accelerator complex, the National Research Centre “Kurchatov Institute” established and launched the Energy Dispersion EXAFS Spectroscopy station. This station will allow investigating the resource of materials under synchrotron radiation beams when irradiated with fast neutrons with an energy spectrum close to those that will be generated on the storage rings of the NICA collider. Based on research on theme 1107, eight publications have been published and two patents for inventions have been obtained.

Для проведения структурных исследований радиационных повреждений материалов, используемых для изготовления сверхпроводящих магнитов ускорительного комплекса NICA, в НИЦ «Курчатовский институт» создана и запущена станция энергодисперсионной EXAFS-спектроскопии. Эта станция позволит исследовать на пучках синхротронного излучения ресурс материалов при облучении быстрыми нейтронами с энергетическим спектром, близким тому, что будет генерироваться на накопительных кольцах коллайдера NICA. По результатам исследований в рамках темы 1107 опубликовано 8 печатных работ и получено 2 патента на изобретения.

Список литературы / References

1. *Khushvaktov J. N., Adam J. et al.* Monte Carlo Simulation and Experimental Results on Neutron Production in the Uranium Spallation Target QUINTA Irradiated with 660 MeV Protons // *Appl. Radiat. Isot.* 2018. V. 137. P. 102–107.
2. *Shafeev G., Barmina E. et al.* Decay of ^{152}Eu and ^{239}Np in the Process of Microwave and Laser Irradiation // *Intern. Conf. NUCLEUS-2019, Dubna, Russia, 1–5 July 2019.*
3. *Tyutyunnikov S. et al.* Experimental Background of a Large Uranium Target (a Quasiinfinite Target ^{238}U) on Proton Beam // *Intern. Conf. NUCLEUS-2019, Dubna, Russia, 1–5 July 2019. Book of Abstracts.* P. 329.
4. *Hashemi-Nezhad S. R., Asquith N. Y. et al.* Transmutation of Uranium and Thorium in the Particle Field of QUINTA Sub-Critical Assembly // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* 2018. V. 883. P. 96–114.
5. *Бармина Е., Симакин А. и др.* Влияние лазерного излучения на гамма-активность водных растворов соли ^{152}Eu // *Квантовая электроника.* 2019. Т. 49, № 8. С. 784–787.
Barmina E., Simakin A. et al. The Laser Radiation Impact on Gamma Activity of Aqueous Solutions of ^{152}Eu Salt // *Quantum Electron.* 2019. V. 49, No. 8. P. 784–787 (in Russian).
6. *Paraipan M., Baldin A. A., Baldina E. G., Tyutyunnikov S. I.* Beam and Target Optimization for Energy Production in Accelerator Driven System // *Baldin ISHEPP XXIV EPY Web Conf.* 2019. V. 204.
7. *Suchopár M., Wagner V., Svoboda O., Vrzalová J., Chudoba P., Tichý P., Majerle M., Krása A., Kugler A., Adam J., Závorka L., Baldin A., Furman W., Kadykov M., Khushvaktov J., Solnyshkin A., Tsoumpko-Sitnikov V., Tyutyunnikov S.* Activation Measurement of Neutron Production and Transport in a Thick Lead Target and a Uranium Blanket during 4 GeV Deuteron Irradiation // *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A.* 2018; <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.08.120>
8. *Voronko V., Zhadan A., Sotnikov V., Adam J., Zhuk I., Baldin A., Berlev A., Solnyshkin A., Tyutyunnikov S., Furman W., Husak K.* Estimation of the Beam Power Gain for Deep-Subcritical Uranium Assembly QUINTA under Relativistic Proton, Deuteron and Carbon Nuclei Irradiation // *Probl. Atom. Sci. Tech.* 2018. V. 115. No. 3. P. 183–187.