

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЧЕНИЙ РЕАКЦИИ $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, X)^{11}\text{C}$ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ МОНИТОРА ИНТЕНСИВНОСТИ ВЫВЕДЕННОГО ПУЧКА ИОНОВ УГЛЕРОДА КЛИНИЧЕСКИ ЗНАЧИМЫХ ЭНЕРГИЙ

А. Г. Васильева^{1,*}, *М. Ю. Костин*¹, *В. А. Пикалов*¹,
*О. В. Суманев*¹, *А. А. Янович*¹

¹ Институт физики высоких энергий им. А. А. Логонова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»,
Протвино, 142281, Россия

В НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ разработана оригинальная методика абсолютной калибровки ионизационных камер активационными детекторами при работе с выведенными пучками ускоренных ионов углерода клинически необходимых энергий (150–450 МэВ/нуклон). Используется низкофоновая радиометрическая установка, работающая по принципу γ - γ -совпадений, активационный детектор из чистого углерода с естественной смесью изотопов и реакция $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, X)^{11}\text{C}$. Для увеличения точности данной методики на ускорительном комплексе У-70 были получены экспериментальные значения сечения реакции $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, X)^{11}\text{C}$ на энергии 450 и 400 МэВ/нуклон. Проведено сравнение с имеющимися мировыми данными, показано, что полученный результат находится с ними в удовлетворительном согласии.

The National Research Centre “Kurchatov Institute” — IHEP has developed an original technique for absolute calibration of ionization chambers with activation detectors when working with extracted beams of accelerated carbon ions of clinical energies (150–450 MeV/nucleon). A low-background radiometric setup operating on the principle of γ - γ coincidences, an activation detector made of pure carbon with a natural mixture of isotopes, and the reaction $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, X)^{11}\text{C}$ are used. To increase the accuracy of this technique, experimental values of the cross section of the reaction $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, X)^{11}\text{C}$ at energies of 450 and 400 MeV/nucleon were obtained at the U-70 accelerator complex. A comparison with existing world data was made, and it was shown that the obtained result is in satisfactory agreement with them.

PACS: 41.75.Ak; 82.80.Jp; 81.05.U.—; 87.53.Bn; 29.40.Cs

* E-mail: vasilyeva-ag@ihep.ru

ВВЕДЕНИЕ

Современные исследования показывают, что лучевая терапия ускоренными ионами углерода особенно успешна в лечении радиорезистентных гипоксичных опухолей [1]. В настоящий момент в НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ ведутся работы по созданию первого в России экспериментально-клинического центра ионной лучевой терапии (ЭКЦ ИЛТ) на базе действующего ускорительного комплекса У-70 [2], на котором освоен медленный вывод пучка ускоренных ионов углерода промежуточных энергий в экспериментальный зал 1БВ. Ведется разработка технологий использования ионов углерода в медицинских целях. В числе прочего разработана методика калибровки ионизационных камер и датчиков обратной связи выведенного пучка ионов углерода клинически значимых энергий активационными детекторами [2, 3]. Указанная методика позволяет реализовать калибровку ионизационных камер для измерения интенсивности пучка ионов углерода в диапазоне энергий 150–450 МэВ/нуклон. При этом используется низкофоновая радиометрическая установка, работающая по принципу γ - γ -совпадений, активационный детектор из чистого углерода с естественной смесью изотопов и реакция $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, X)^{11}\text{C}$. По данной методике уже в течение нескольких сеансов работы ускорительного комплекса У-70 проводится калибровка плоскопараллельной ионизационной камеры измерения интенсивности пучка на экспериментальной установке «Радиобиологический стенд».

Для увеличения точности активационной методики необходимо как можно точнее знать сечение реакции образования ^{11}C в углеродных мишенях в диапазоне клинически необходимых энергий (150–450 МэВ/нуклон). Для большинства реакций, которые используются на протонных ускорителях, сечения измерены с погрешностью не хуже 4% в широком диапазоне энергий протонов. Все измеренные сечения реакций собраны в библиотеки данных, основанные на большом количестве накопленных экспериментальных данных, и поддерживаются международным физическим сообществом (например, [4–6]). Хотя ионные ускорители уже давно используются в экспериментальной физике, библиотечные сечения реакции $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, X)^{11}\text{C}$ экспериментально измерены лишь для некоторых фиксированных энергий [5], при этом можно заметить, что существует значительная разница как между экспериментальными данными о сечениях [7–11], так и между экспериментальными данными и компьютерным моделированием [12, 13]. Из полного набора рассмотренных данных так до конца и остается не ясным, существует ли рост сечения $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, X)^{11}\text{C}$ с уменьшением энергии, что характерно, например, для реакции $^{12}\text{C}(p, pn)^{11}\text{C}$ [11]. Также эти данные были бы крайне полезны для проверки и оптимизации моделей ядерных реакций в транспортных кодах переноса излучения Монте-Карло, используемых в адронной терапии в системах планиро-

вания лечения. Подобное совершенствование кодов Монте-Карло будет иметь прямое клиническое значение.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ИЗМЕРЕНИЮ СЕЧЕНИЯ РЕАКЦИИ $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, X)^{11}\text{C}$ ДЛЯ ЭНЕРГИЙ ЯДЕР УГЛЕРОДА 400 И 450 МэВ/НУКЛОН В НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ» — ИФВЭ

В октябре и декабре 2024 г. на ускорительном комплексе У-70 во время углеродного сеанса были проведены два эксперимента по измерению сечения этой реакции на энергии 450 и 400 МэВ/нуклон.

Эксперимент по измерению сечения заключается в облучении мишени известного состава известным количеством частиц известной энергии и последующем измерении активности радионуклида, образовавшегося в мишени после облучения. В данной работе в качестве мишени был использован диск из графита высокой чистоты (99,99 %) диаметром 120 мм, толщиной 5,37 мм и плотностью 1,719 г/см³. Для измерения активности после облучения активационного детектора из чистого углерода использовалась разработанная ранее радиометрическая установка, работающая по принципу γ - γ -совпадений [3]. Для расчета сечения ядерной реакции σ (см²) использовалась формула

$$\sigma = \frac{C_0 \tau}{N_{\text{я}} d I \varepsilon}, \quad (1)$$

где C_0 — активность изотопа мишени на момент конца облучения; τ — постоянная распада, рассчитываемая по формуле (2); $N_{\text{я}}$ — число ядер в единице объема мишени (см⁻³), рассчитываемое по формуле (3); d — толщина мишени (см); I — число частиц (ядер углерода), прошедших через мишень; ε — эффективность регистрации радиометрической установки.

$$\tau = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}, \quad (2)$$

где $T_{1/2}$ — период полураспада изотопа мишени,

$$N_{\text{я}} = \left(\frac{\rho}{A} \right) N_{\text{А}}, \quad (3)$$

где $N_{\text{А}}$ — число Авогадро; A — атомная масса материала мишени; ρ — плотность материала мишени.

Формулу (1) можно применять, когда время облучения активационно-го детектора много меньше периода полураспада образующегося изотопа. Эксперименты были проведены на протонном синхротроне-бустере У-1.5 на выведенном пучке ядер углерода. В углеродной моде режим работы ускорителя У-1.5 следующий: выводится 1 банч ионов длительностью 100 нс один раз в 9 с. Это полностью удовлетворяет возможности использования при расчете сечения формулы (1), так как время облучения

мишени много меньше периода полураспада образующегося изотопа ^{11}C (20,34 мин [14]).

Для расчета по формуле (1) требуется измерить число ядер углерода, выведенных из ускорителя У-1.5 и прошедших через графитовую мишень. Для этих целей был использован измеритель интенсивности углеродного пучка, расположенный после окончания вакуумного ионпровода канала транспортировки пучка из У-1.5 на поглотитель. Измеритель был полностью разработан и изготовлен в НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ в рамках создания единой системы измерения интенсивности выведенных пучков протонов или ионов из ускорителя У-1.5. Точность данного измерителя составляет $\pm 2\%$. В качестве датчика интенсивности углеродного пучка в измерителе используется импульсный трансформатор тока (ТТ), работающий в интегрирующем (резонансном) режиме. Сигнал в виде затухающего колебания, возбуждаемый при прохождении пучка, усиливается головным усилителем, установленным в нескольких метрах от ТТ, и по коаксиальному кабелю поступает в помещение пульта управления бустером У-1.5, где смонтирована обрабатывающая электроника, основным узлом которой является пиковый детектор, выделяющий требуемый пик сигнала. Уровень сигнала с пикового детектора измерителя определялся мультиметром Keithley 2000 (Keithley Instruments, Tektronix, Inc., США), а данные с него передавались на персональный компьютер оператора. Перед экспериментами по измерению сечения была произведена работа по калибровке измерителя.

Активационный детектор размещался перед поглотителем пучка в кольцевом зале ускорителя У-1.5. Для точного позиционирования детектора относительно выведенного пучка предварительно в пучке была облучена радиохромная пленка типа Gafchromic EBТ3 (Ashland, США) (рис. 1, а). Для контроля положения пучка во время облучения также использовалась радиохромная пленка EBТ3, прикрепленная поверх детектора (рис. 1, б). На энергии (450 ± 3) МэВ/нуклон облучение активационного детектора было выполнено одним сгустком ионов углерода, выведенного на поглотитель пучка интенсивностью $4,23 \cdot 10^9$ ионов C^{6+} , чтобы не учитывать распад изотопа ^{11}C между импульсами вывода ускорителя. В следующем эксперименте облучение активационного детектора проводилось сгустком ионов углерода с интенсивностью $1,37 \cdot 10^9$ ионов C^{6+} на энергии $(402,5 \pm 3)$ МэВ/нуклон.

В момент окончания облучения включался секундомер «Агат СОПр-2а-3-000» (ПАО «ЗЧЗ», Златоуст). Показания секундомера использовались при начале обсчета активационного детектора на радиометрической установке и для вычисления активности C_0 изотопа ^{11}C в мишени на момент окончания облучения. После облучения активационный детектор изымался из места облучения и помещался в кассету радиометрической установки после доставки к ней. Радиометрическая установка перед измерениями была включена на прогрев, был измерен собственный фон установки, и определена эффективность регистрации

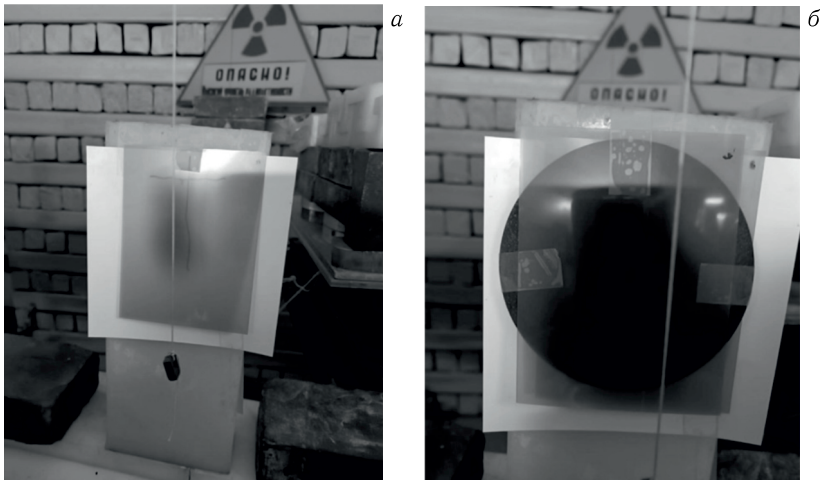


Рис. 1. Позиционирование активационного детектора перед поглотителем пучка в кольцевом зале ускорителя У-1.5 с помощью радиохромной пленки ЕВТЗ: а) облученная пленка перед облучением детектора; б) две пленки и детектор после облучения детектора ионами углерода

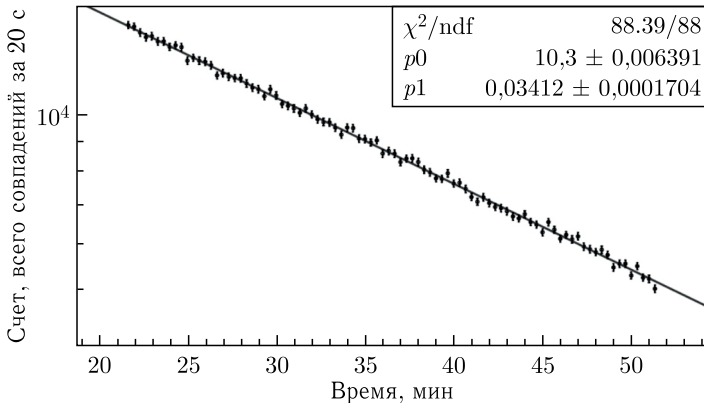


Рис. 2. Зависимость скорости счета от времени после окончания облучения активационного детектора. Линией показана аппроксимирующая кривая

установки ε при помощи контрольного источника ^{22}Na из набора образцовых спектрометрических гамма-источников (ОСГИ). В качестве амплитудного анализатора и счетчика импульсов использовался прибор АЦП-USB-8К-П производства АСПЕКТ (Дубна). На рис. 2 представлен график зависимости скорости счета γ - γ -совпадений от времени выдержки после окончания облучения активационного детектора ионами

углерода. Длительность интервала была 20 с, полный набор — 90 временных интервалов (30 мин).

Образующиеся при высоких энергиях в мишени сторонние радиоактивные изотопы имеют очень короткие периоды полураспада (19,3 с для ^{10}C и не более 10 мкс для остальных [14]), поэтому непосредственно процесс измерения скорости счета запускался через 20 мин после окончания облучения. Обработка выполнялась в ROOT [15]. Кривая радиоактивного распада ^{11}C аппроксимировалась экспоненциальной функцией, где параметр $p1$ — постоянная распада ^{11}C

$$C = e^{(p0 - p1t)}. \quad (4)$$

Тогда активность изотопа в секунду на момент конца облучения будет равна

$$C_0 = e^{p0}/20. \quad (5)$$

2. РЕЗУЛЬТАТ ИЗМЕРЕНИЯ, СРАВНЕНИЕ С МИРОВЫМИ ДАННЫМИ

Вычисление сечения реакции $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, X)^{11}\text{C}$ было произведено по формуле (1). При помощи FLUKA 4-4.1 [16] и пакета DPMJET 3 был рассчитан и введен поправочный коэффициент для условий реального эксперимента. Схема эксперимента, на основании которой проводилось моделирование, представлена на рис. 3.

С учетом применения поправочного коэффициента (0,99493 для 450 МэВ/нуклон и 0,99490 для 402,5 МэВ/нуклон) сечение реакции $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, X)^{11}\text{C}$ для энергии (450 ± 3) МэВ/нуклон составило $\sigma_{450} = (64,9 \pm 3,3)$ мб ($1 \text{ б} = 10^{-24} \text{ см}^2$), а для энергии

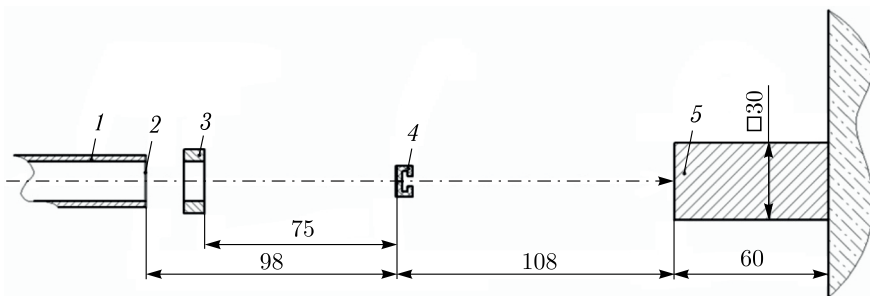


Рис. 3. Схема эксперимента по измерению сечения реакции $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, X)^{11}\text{C}$ в реальной геометрии (вид сверху). Штрихпунктирная стрелка — направление пучка; 1 — вакуумная камера ионпровода; 2 — выходное окно из нержавеющей стали толщиной 200 мкм; 3 — бесконтактный датчик интенсивности выведенного пучка (ТТ); 4 — графитовая мишень, закрепленная на экранирующем блоке Neutrostop (Koros Kolín, Чехия) формы типа С стандартных размеров из полиэтилена; 5 — свинцовый поглотитель

$(402,5 \pm 3)$ МэВ/нуклон — $\sigma_{400} = (63,5 \pm 3,2)$ мб. В оценку погрешности измерения вошли следующие систематические неопределенности: неопределенность, связанная с измерением эффективности регистрации установки, определяющаяся главным образом паспортным значением неопределенности измерения активности контрольного источника, и точность опытного измерителя интенсивности углеродного пучка, составляющие, соответственно, 3 и 2%. Остальными систематическими неопределенностями в данном измерении было принято решение пренебречь ввиду их малости. Статистические неопределенности так же пренебрежительно малы по сравнению с систематическими и составляют менее 1%.

Полученный результат в целом имеет хорошее согласие с имеющимися общемировыми данными, сравнение приведено в таблице.

Сечения реакции $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, X)^{11}\text{C}$

Энергия пучка ^{12}C , МэВ/нуклон	Сечение реакции, мб	Источник
400	$63,5 \pm 0,5$	[7]
400	$68,6 \pm 2,5$	[9]
402,5	$63,5 \pm 3,2$	Данные из этой работы
417,5	$72,3 \pm 14,5$	[11]
450	$64,9 \pm 3,3$	Данные из этой работы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью повышения точности разработанной в НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ методики калибровки ионизационных камер и датчиков обратной связи выведенного пучка ионов углерода клинически значимых энергий активационными детекторами на протонном синхротроне У-1.5 выполнены эксперименты по измерению сечений реакции $^{12}\text{C}(^{12}\text{C}, X)^{11}\text{C}$ при энергиях 400 и 450 МэВ/нуклон. Проведено сравнение с имеющимися мировыми данными, показано, что полученный результат находится с ними в удовлетворительном согласии. Работа выполнена в рамках разработки технологий использования ионов углерода в медицинских целях в строящемся ЭКЦ ИЛТ на базе действующего ускорительного комплекса У-70 в НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ.

Финансирование. Данная работа финансировалась за счет средств бюджета НИЦ «Курчатовский институт» — ИФВЭ. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Конфликт интересов. Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Durante M., Orecchia R., Loeffler J.S.* Charged-Particle Therapy in Cancer: Clinical Uses and Future Perspectives // *Nat. Rev. Clin. Oncol.* 2017. V. 14. P. 483–495.
2. *Antipov Yu. M., Vasilyeva A. G., Vasiliev D. A., Kalinin V. A., Koshelev A. V., Makonin S. V., Maximov A. V., Parmenova E. V., Pikalov V. A., Polkovnikov M. K., Soldatov A. P., Koryakina E. V., Koryakin S. N., Saburov V. O., Solovov A. N., Troshina M. V., Perevezentsev A. A., Shtemberg A. S., Sirota N. P., Smirnova E. N., Rozanova O. M., Belyakova T. A.* Status of the Experimental Setup Radiobiological Stand (RBS) on a Beam of Carbon Nuclei Extracted from the U-70 Accelerator Complex // *Instrum. Exp. Tech.* 2024. V. 67, No. 2. P. S300–S304.
3. *Васильева А. Г., Костин М. Ю., Пикалов В. А., Янович А. А.* Разработка установки для калибровки ионизационных камер и датчиков обратной связи выведенного пучка ионов углерода активационными детекторами // *Учен. зап. физ. фак-та Моск. ун-та.* 2025. № 2. Ст. 2520201.
4. Evaluated Nuclear Data File (ENDF). <https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm> (accessed 30.08.2025).
5. IBANDL. Ion Beam Analysis Nuclear Data Library. <https://www-nds.iaea.org/exfor/ibandl.htm> (accessed 30.08.2025).
6. Charged-Particle Cross Section Database for Medical Radioisotope Production. <https://www-nds.iaea.org/medical> (accessed 30.08.2025).
7. *Smith A. R., McCaslin J. B., Geaga J. V., Hill J. C., Vary J. P.* Cross Sections for the Production of ^{11}C in C Targets by ^{12}C at Relativistic Energies // *Phys. Rev. C.* 1983. V. 28. P. 1614–1617.
8. *Yashima H., Uwamino Y., Iwase H., Sugita H., Nakamura T., Ito S., Fukumura A.* Measurement and Calculation of Radioactivities of Spallation Products by High-Energy Heavy Ions // *Radiochim. Acta.* 2003. V. 91. P. 689–696.
9. *Yashima H., Uwamino Y., Iwase H., Sugita H., Nakamura T., Ito S., Fukumura A.* Cross Sections for the Production of Residual Nuclides by High-Energy Heavy Ions // *Nucl. Instr. Meth. B.* 2004. V. 226. P. 243–263.
10. *Salvador S., Colin J., Cussol D., Divay C., Fontbonne J.-M., Labalme M.* Cross Section Measurements for Production of Positron Emitters for PET Imaging in Carbon Therapy // *Phys. Rev. C.* 2017. V. 95, No. 4. P. 044607.
11. *Horst F., Adi W., Arico G., Brinkmann K.-T., Durante M., Reidel C.-A., Rovituso M., Weber U., Zaunick H.-G., Zink K., Schuy C.* Measurement of PET Isotope Production Cross Sections for Protons and Carbon Ions on Carbon and Oxygen Targets for Applications in Particle Therapy Range Verification // *Phys. Med. Biol.* 2019. V. 64. P. 205012–205028.
12. *Pshenichnov I. A., Larionov A., Mishustin I. N., Greiner W.* PET Monitoring of Cancer Therapy with ^3He and ^{12}C Beams: A Study with the GEANT4 Toolkit // *Phys. Med. Biol.* 2007. V. 52. P. 7295–7312.
13. *Arico G., Battistoni G., Cerutti F., Horst F., Mairani A., Schuy C., Weber U., Ferrari A.* Benchmarking of FLUKA Production Cross Sections of Positron Emission Tomography Isotopes for *In-Vivo* Range Verification in Hadron Therapy // *Eur. Phys. J. Web Conf.* 2020. V. 239. P. 24001.

14. *Kondev F. G., Wang M., Huang W.J., Naimi S., Audi G.* The NUBASE2020 Evaluation of Nuclear Properties // *Chin. Phys. C.* 2021. V. 45, No. 3. P. 030001.
15. ROOT Data Analysis Framework. <https://root.cern.ch/> (accessed 30.08.2025).
16. The Official CERN FLUKA Website. <https://fluka.cern> (accessed 30.08.2025).