

РАДИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЫВОДА ЦИКЛОТРОНА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

А. Н. КИЙКО

(Белорусский государственный институт метрологии, Минск);
канд. физ.-мат. наук, доц. С. А. ВАБИЩЕВИЧ, Н. В. ВАБИЩЕВИЧ
(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой);
канд. физ.-мат. наук Д. И. БРИНКЕВИЧ
(Белорусский государственный университет, Минск)

Рассмотрены радиологические и экономические вопросы демонтажа циклотронов различных типов, накопление радионуклидов (РН) в деталях самого циклотрона и активация стен бункера циклотрона вследствие захвата вторичных нейтронов. В бетоне бункера циклотрона в результате (n, γ)-реакций на тепловых нейтронах образуются радионуклиды ^{152}Eu , ^{60}Co , ^{46}Sc с периодом полураспада от 2,6 до 14 лет и активностью 0,1–11 кБк/кг. Максимум их распределения обычно лежит на глубине 10–15 см. В деталях циклотрона и металлической инфраструктуре бункера основными радионуклидами являются ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{65}Zn . Проведенный анализ накопления долгоживущих радионуклидов имеет важное значение для проектирования новых циклотронных производств с целью обеспечения радиационной безопасности и хранения радиоактивных отходов и, как следствие, минимизации дозовых нагрузок персонала при демонтаже циклотрона.

Ключевые слова: циклотрон, вывод из эксплуатации, радионуклиды, нейтронная активация бетона.

Введение. В настоящее время в мире работают более двух тысяч коммерческих циклотронов. Основным предназначением более 70% из них является производство медицинских радионуклидов [1]. Бурное развитие ПЭТ-технологии началось в конце 80-х гг. прошлого столетия. Поскольку срок службы «медицинских» циклотронов составляет 20 лет, в настоящее время начинается процесс вывода их из эксплуатации, который со временем будет интенсифицироваться. Следует заметить, что за последние несколько лет токи пучка, используемые в коммерчески доступных циклотронах, резко увеличились, поэтому активация материалов в хранилищах циклотронов теперь может представлять более серьезные радиологические опасности. Это требует более тщательного регулирующего надзора за работой и обслуживанием циклотронов и актуализирует вопросы будущей деятельности по выводу их из эксплуатации [2]. Исследование накопления долгоживущих радионуклидов также необходимо для проектирования новых циклотронных производств с целью обеспечения радиационной безопасности и хранения радиоактивных отходов (РАО).

Стоимость вывода «медицинского» циклотрона из эксплуатации сильно зависит от номенклатуры и активности накопленных в результате работы циклотрона долгоживущих радионуклидов [3]. Для снижения будущих затрат на демонтаж необходимо заранее оценить количество радиоактивных отходов, чтобы определить оптимальную стратегию вывода из эксплуатации. Это обстоятельство обуславливает необходимость идентификации радионуклидов и определения их активности непосредственно после вывода циклотрона из эксплуатации [4]. Литературные данные по данной проблеме ограничены и в основном касаются циклотронов с токами пучка 10–35 мкА [1; 4–6]. В современных циклотронах токи пучка достигают 100–300 мкА [7], что неизбежно будет приводить к более сильной активации материалов в хранилищах циклотронов и, соответственно, увеличивать стоимость работ по выводу их из эксплуатации. Отметим, что в литературе ощущается явный недостаток информации для оценки реальных радиологических и экономических последствий будущего демонтажа циклотронов [5].

Вывод циклотрона из эксплуатации. У рассматриваемой проблемы есть два аспекта: накопление радионуклидов в деталях самого циклотрона и активация стен бункера циклотрона вследствие захвата вторичных нейтронов. Накопление в наиболее часто заменяемых деталях циклотрона (стриппере, входном окне и теле мишени) было рассмотрено ранее в работах [8–14]. Ниже будет рассмотрено накопление РН в других деталях циклотрона и бетоне стен бункера. Отметим, что активация воздуха в хранилище циклотрона при надлежащей вентиляции не представляет значительной радиологической опасности для персонала при интенсивностях луча, используемых в настоящее время [2].

Активация бетонной защиты – одна из важнейших проблем при выводе циклотрона из эксплуатации. Активация бетона производится вторичными нейтронами и фотонами. Они генерируются при столкновении протонов с деталями ускорителя во время транспортировки пучка и при взаимодействии с мишенью. Хотя принципы активации хорошо известны, доступны лишь ограниченные исследования наведенной радиоактивности в бетонной защите [1; 4; 5]. Отметим, что исследованию воздействия нейтронного излучения от циклотрона на различные объекты в бункере циклотрона в последние годы посвящен ряд работ [5; 15–18].

В работе [5] представлены результаты исследований для циклотрона, находившегося в Vrije Universiteit Brussel (максимальная энергия протонов 43 МэВ, максимальная интенсивность ионного пучка 100 мкА). Отбирались керны бетонной защиты диаметром 50 мм. Они были проанализированы гамма-спектрометром высокого разрешения (HPGe-детектор) с поправкой на самопоглощение и с учетом геометрии измерения. Куски арматурной стали измерялись отдельно.

В таблице 1 показаны радионуклиды, обнаруженные в бетоне после гамма-спектрометрического анализа. Из-за высокого сечения захвата тепловых нейтронов ^{151}Eu и длительного периода полураспада ^{152}Eu этот нуклид присутствует в больших количествах в активированном бетоне. Наибольшая обнаруженная удельная активность ^{152}Eu составила 11 кБк/кг. При использовании баритбетона и бетона с высоким содержанием Na наиболее важными радионуклидами являются ^{133}Ba и ^{22}Na . Максимальная удельная активность ^{133}Ba составляла 1,8 кБк/кг. На профилях активации бетона по глубине для циклотрона наблюдается максимум на глубине 15 см [5]. Затем происходит квазиэкспоненциальный спад активности.

В активированном бетоне также был обнаружен тритий с удельной активностью до 380 кБк/кг. Активность ^3H хорошо коррелирует с соответствующей активностью ^{152}Eu . Авторами [5] было высказано предположение, что тритий производится реакциями расщепления, которые происходят вокруг ускорителя. Однако требуются дальнейшие исследования для достоверного объяснения образования ^3H в бетоне.

Таблица 1. – Радионуклиды, идентифицированные в бетонной защите [5]

Радионуклид	Возможная реакция	Сечение реакции	Период полураспада
^{152}Eu	$^{151}\text{Eu} (n, \gamma) ^{152}\text{Eu}$	9198 barn	13,33 лет
^{154}Eu	$^{153}\text{Eu} (n, \gamma) ^{154}\text{Eu}$	312 barn	8,8 лет
^{60}Co	$^{59}\text{Co} (n, \gamma) ^{60}\text{Co}$	37 barn	5,3 лет
^{134}Cs	$^{133}\text{Cs} (n, \gamma) ^{134}\text{Cs}$ $^{134}\text{Ba} (n, p) ^{134}\text{Cs}$	29 barn 9 mbarn at $E_n = 16 \text{ MeV}$	2,06 лет
^{46}Sc	$^{45}\text{Sc} (n, \gamma) ^{46}\text{Sc}$	27 barn	83 лет
^{133}Ba	$^{132}\text{Ba} (n, \gamma) ^{133}\text{Ba}$	7 barn	10,5 лет
^{54}Mn	$^{55}\text{Mn} (n, 2n) ^{54}\text{Mn}$ $^{54}\text{Fe} (n, p) ^{54}\text{Mn}$	910 mbarn at $E_n = 18 \text{ MeV}$ 590 mbarn at $E_n = 10 \text{ MeV}$	312 дней
^{22}Na	$^{23}\text{Na} (n, 2n) ^{22}\text{Na}$ $^{27}\text{Al} (n, 2p4n) ^{22}\text{Na}$	40 mbarn at $E_n = 15 \text{ MeV}$ 10 mbarn at $E_n = 25 \text{ MeV}$	2,6 лет
^{137}Cs	$^{136}\text{Ba} (n, \gamma) ^{137m}\text{Ba} \rightarrow ^{137}\text{Cs}$ $^{137}\text{Ba} (n, p) ^{137}\text{Cs}$	0,4 barn 3,7 mbarn at $E_n = 16 \text{ MeV}$	30 лет

Удельная активность РН в бетонной защите, металлической инфраструктуре и деталях машин по результатам измерений 3 ускорителей разных типов предоставлена в таблице 2. Отметим широкий диапазон значений, ясно указывающий на то, что в разных ускорителях можно ожидать значительных различий в уровнях активации.

Таблица 2. – Удельная активность радионуклидов в бетоне и металлических деталях циклотронных комнат [5]

Материал	Радионуклид	Удельная активность, Бк/кг
Бетон	^{152}Eu	700–12000
	^{60}Co	80–8000
	^{46}Sc	800–900
Металлическая инфраструктура бункера	^{60}Co	0,10–100
	^{54}Mn	0,09–380
	^{65}Zn	1,64–170
Части ускорителей	^{60}Co	32–5000
	^{54}Mn	0,9–1000
	^{22}Na	1000–10000
	^{57}Co	0,25–100

Авторами [5] также проводился отбор проб различных металлических деталей (алюминий, нержавеющая сталь, обычная сталь, медь, латунь и оцинкованная сталь), находившихся в помещениях ускорителей различного типа, мишенных комнатах и экспериментальных залах. Образцы брались как с ускорителей, так и из окружающей инфраструктуры, которая могла быть активирована нейтронами. В инфраструктурных частях циклотрона, находившегося в Vrije Universiteit Brussel (максимальная энергия протонов 43 МэВ, максимальная интенсивность ионного пучка 100 мкА), обнаружены значительные количества ^{60}Co , ^{65}Zn и ^{54}Mn с удельной активностью от 1 до 200 кБк/кг. Большинство алюминиевых деталей обладали удельной активностью ниже 1 кБк/кг, в то время как некоторые части конструкций из стали и нержавеющей стали имеют удельную активность выше 200 кБк/кг. Обращает на себя внимание тот факт, что ярма основных магнитов и переключающих магнитов, изготовленные из стали с низким содержанием кобальта, в которых Co присутствует только в качестве возможной примеси, активируются лишь незначительно. Высоко активированными частями ускорителя являются устройства вывода пучка, а также ускоряющие конструкции. Они имели удельную активность значительно выше 1 МБк/кг. Арматурные стержни бетонных стен были активированы до 300 кБк/кг.

Активация бетона в бункерах «медицинских» циклотронов GE PETtrace (энергия протонов 16,5 МэВ) и IVA Cyclone 18 HC (энергия 18 МэВ, ток пучка до 100 мкА) исследовалась в работе [17]. Основными долгоживущими радионуклидами, обнаруженными в бетоне, были ^{152}Eu , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{46}Sc , ^{134}Cs с удельными активностями от 0,01 до 0,6 Бк/г. Во всех проведенных измерениях общая концентрация активности превышала уровень допуска, указанный в Директиве (2013) / 59 / Евратом. С учетом гипотетического вывода из эксплуатации двух циклотронов, количество низкоактивных радиоактивных отходов (бетона) оценивается авторами [17] примерно в 93 м³ в случае циклотрона GE PETtrace, и около 58 м³ для IVA Cyclone 18 HC.

В работе [18] проведены теоретические и экспериментальные исследования влияния нейтронного излучения на активацию материалов в бункере работающего «медицинского» циклотрона CYPRI-S-HM18 с энергией протонов 18 МэВ. Режим работы циклотрона – каждое утро в будний день в течение одного часа при ионном токе 50 мкА (наработка ^{18}F). Циклотрон отработал около 200 дней в году, что является типичным для «медицинских» циклотронов. В винте из корпуса циклотрона были обнаружены ^{51}Cr , ^{59}Fe и ^{60}Co , с активностями 24, 0,51 и 3,8 Бк/г соответственно. Указанные РН образуются в результате реакций захвата тепловых нейтронов. В наборе ключей, находившихся в сейфе бункера, индуцировался ^{65}Zn с активностью 12 Бк/г. Они могут быть классифицированы как РАО с очень низкой активностью. У всех РН, кроме ^{60}Co , период полураспада менее 250 дней и при выдержке в течение года их активность будет ниже предела перевода в нерадиоактивные отходы. Большой интерес представляет ^{60}Co , у которого период полураспада 5,27 лет. При длительной работе циклотрона он будет накапливаться и потребуются длительная выдержка для выведения из состава РАО.

В работе [1] была проведена серия ядерных спектроскопических измерений для определения характера и степени протонной и нейтронной активации бункера исследовательского 17-МэВ циклотрона Scanditronix, выведенного из эксплуатации после 20-летней работы (суммарная наработка – 300 000 мкА·ч). Через неделю после вывода из эксплуатации в бетонной стене бункера были обнаружены радионуклиды ^{60}Co , ^{152}Eu , ^{40}K , ^{54}Mn и других. Однако их концентрации были <1 Бк/г, что ниже норм штата Айова, определяющих транспортировку и долговременную экологически безопасную утилизацию. Это обусловило их стандартное захоронение. При исследовании циклотрона через две недели после последнего запуска был выявлен ожидаемый набор коротко- и среднеживущих радионуклидов: ^7Be , ^{22}Na , ^{24}Na , ^{48}Sc , ^{51}Cr , ^{52}Mn , ^{54}Mn , ^{56}Co , ^{57}Co , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{57}Ni , ^{59}Fe , ^{65}Zn с активностями от 2 до 1700 МБк. Последующие расчеты показали, что уровень активности снизится практически до фонового значения через 15 лет, при этом общая остаточная активность всего циклотрона упадет ниже 37 МБк (1 мКи).

Результаты исследований AVF циклотрона (Tohoku University, Япония), среднегодовое время работы которого составляло 1200 ч при токе пучка ~10 мкА, представлены в работе [4]. Через 2 месяца после последнего облучения была определена остаточная радиоактивность основных элементов циклотрона (дефлектора, диэлектрода, пластины заземления, блока ускорителя, ярма магнита) и бетонной стены хранилища циклотрона, которые были сильно активированы за 20 лет эксплуатации. Были обнаружены радиоизотопы ^{65}Zn и ^{60}Co в медных деталях, ^{60}Co , ^{58}Co , ^{51}Cr и ^{54}Mn в нержавеющей стали и ^{152}Eu , ^{60}Co , ^{46}Sc , ^{54}Mn и ^{22}Na в бетоне. Наибольшая активность РН наблюдалась в деталях дефлектора (устройство вывода пучка). Основными РН были ^{65}Zn с активностью до 5030 Бк/г и ^{60}Co с активностью до 3570 Бк/г. Активности ^{54}Mn и ^{22}Na существенно ниже (< 30 Бк/г) и обнаруживались не во всех точках дефлектора. Существенные активности ^{58}Co , ^{56}Co , ^{54}Mn , ^{65}Zn и ^{60}Co (до 900 Бк/г) были обнаружены в ускоряющем электроде и пластине заземления. В блоке ускорителя под воздействием вторичных нейтронов индуцировались следующие РН: ^{60}Co (активность до 487 Бк/г), ^{58}Co (до 66 Бк/г), ^{51}Cr (до 263 Бк/г) и ^{54}Mn (до 32 Бк/г). Основную долю

в остаточную активность циклотрона (44%) вносил ^{60}Co . Через год после удаления циклотрона распределение мощности дозы в различных точках бункера варьировалось в пределах 0,3–1,2 мкЗв/ч, что почти на порядок выше естественного радиационного фона, однако ниже, чем фон, допустимый японским регулятором (1,8 мкЗв/ч). В бетоне удельные активности РН ^{152}Eu , ^{60}Co , ^{46}Sc , ^{54}Mn и ^{22}Na варьировались в диапазоне 0,1–2 Бк/г. Радионуклиды ^{152}Eu , ^{60}Co , ^{46}Sc образуются в результате (n, γ)-реакций на тепловых нейтронах и имеют максимум распределения на глубине 10 см. Это хорошо согласуется с данными работы [5], приведенными выше. ^{54}Mn и ^{22}Na обусловлены (n, 2n)-реакциями на быстрых нейтронах, в связи с чем имеют спадающий характер распределения активности по глубине.

Проведенные исследования распределения активности позволяют оценить в реальных ситуациях как немедленные, так и отложенные затраты на вывод циклотронов из эксплуатации с учетом национального законодательства, цены на обращение с отходами, затраты на рабочую силу и оценить эффективность разных методов вывода из эксплуатации.

Заключение. Таким образом, в бетоне бункера циклотрона в результате (n, γ)-реакций на тепловых нейтронах образуются радионуклиды ^{152}Eu , ^{60}Co , ^{46}Sc с периодом полураспада от 2,6 до 14 лет и активностью 0,1–11 кБк/кг. Максимум их распределения обычно лежит на глубине 10–15 см. В деталях циклотрона и металлической инфраструктуре бункера основными радионуклидами являются ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{65}Zn . Вывод из эксплуатации ускорителей частиц можно рассматривать как техническую операцию без каких-либо особых трудностей. Относительно низкий уровень радиоактивности в деталях циклотрона и бетоне бункера позволяет использовать практические методы, аналогичные применяемым при техобслуживании и ремонте. Никаких усиленных защитных мер при выводе из эксплуатации не требуется, за исключением недопущения распространения активности во время демонтажных работ (например, использования взрывных технологий).

Однако следует учитывать, что количество РАО может быть значительным из-за активации больших объемов низкоактивных бетонных конструкций бункера. Кроме того, необходимо отметить, что затраты на вывод из эксплуатации ускорителей составляют от 50 до 100% сегодняшних инвестиционных затрат на подобные устройства. Этот факт обычно недооценивается пользователями ускорителей. В докладе European Organization for Nuclear Research отмечается, что проблемы вывода циклотронов из эксплуатации необходимо учитывать уже на этапе проектирования [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. Consideration, measurements and logistics associated with low-energy cyclotron decommissioning/ J. J. Sunderland [et al.] // 14th Intern. Workshop on Targetry and Target Chemistry. AIP Conf. Proc. – 2012. – V. 1509. – P. 16–20. – DOI: [10.1063/1.4773931](https://doi.org/10.1063/1.4773931).
2. Activation of air and concrete in medical isotope production facilities. / A. C. Dodd [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2017. – Vol. 1845. – DOI: [10.1063/1.4983537](https://doi.org/10.1063/1.4983537).
3. Study on the regulation improvement of domestic cyclotron decommissioning through the questionnaires on the current cyclotron operation status [Electronic resource] / Da-yeong Gwon [et al.] // Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting Jeju, Korea, May 18–19, 2017. – Mode of access: www.kns.org/files/pre_paper/37/17S-309권다연.pdf. – Date of access: 18.10.2022.
4. Measurements of residual radioactivity of machine elements and concrete on the cyclotron decommissioning / T. Shiomi [et al.] // J. Nuclear Science Technology. – March 2000. – S. 1. – P. 357–361.
5. Radiological and economic impact of decommissioning charged particle accelerators / M. Sonck [et al.] // IRPA-10: Proc. of the 10th intern. congress of the International Radiation Protection Association on harmonization of radiation, human life and the ecosystem, Hiroshima, 14–19 May 2000 / Japan Health Physics Society. – Hiroshima, 2000. – P. 1v.
6. Spinney, G. Thoughts on decommissioning the CERN synchrocyclotron [Electronic resource] / G. Spinney // Proc. of the 13th Intern. Conf. on Cyclotrons and their Applications / Vancouver, BC, Canada. – 1992. – P. 47–49. – Mode of access: <https://accelconf.web.cern.ch/c92/papers/i-07.pdf>. – Date of access: 18.10.2022.
7. Routine ^{18}F -production with 180 μA to 200 μA target beam current on a GE PETtrace 800 Cyclotron / Eberl S. [et al.] // AIP Conference Proceedings. – 2012. – V. 1509. – P. 66–70. – DOI: [10.1063/1.4773942](https://doi.org/10.1063/1.4773942).
8. Бринкевич, С. Д. Активационные радионуклиды при облучении ниобиевой мишени на циклотроне Cyclone 18/9 НС / С. Д. Бринкевич, Д. И. Бринкевич, А. Н. Кийко // Ядерная физика и инжиниринг. – 2019. – Т. 10, № 6. – С. 574–580.
9. Пленки пиролитического графита, облученного ионами водорода H^+ / С. А. Вабищевич [и др.] // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 13-й Междунар. конф., Минск, 30 сент. – 3 окт. 2019 г. / Белорус. гос. ун-т ; редкол.: В. В. Углов (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2019. – С. 43–45.
10. Gamma-ray spectrometric characterization of waste activated target components in a PET cyclotron / P. Guarino [et al.] // Cyclotrons and Their Applications–2007: Eighteenth International Conference (01–05.10.2007). Giardini Naxos, Italy. – P. 295–297.
11. Долгоживущие радионуклиды в производстве 2- ^{18}F фтордезоксиглюкозы / Д. И. Бринкевич [и др.] // Медицинская физика. – 2018. – № 1(77). – С. 80–88.
12. Обращение с водными радиоактивными отходами при производстве радиофармпрепаратов на основе ^{18}F / В. О. Крот [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2018. – № 4. – С. 128–134.

13. Бринкевич, Д. И. Активация воды контура охлаждения циклотрона Cyclone 18/9 HC при наработке ^{18}F / Д. И. Бринкевич, А. Я. Малиборский, С. Д. Бринкевич // Ядерная физика и инжиниринг. – 2018. – Т. 9, № 4 – С. 404–410. – DOI: [10.1134/S2079562918040024](https://doi.org/10.1134/S2079562918040024).
14. Накопление радионуклидов в сменных деталях и водной мишени циклотрона / А. Н. Кийко [и др.] // Вестн. Полт. гос. ун-та. Сер. С, Фундам. науки. – 2022. – № 4(38). – С. 69–80.
15. Biegała, M. Levels of exposure to ionizing radiation among the personnel engaged in cyclotron operation and the personnel engaged in the production of radiopharmaceuticals, based on radiation monitoring system / M. Biegała, T. Jakubowska // Radiation Protection Dosimetry. – 2020. – Vol. 189, iss. 1 – P. 56–62. – DOI: [10.1093/rpd/ncaa012](https://doi.org/10.1093/rpd/ncaa012).
16. Estimation of neutron production yields from H_2^{18}O as the ^{18}F -production target bombarded by 18-MeV protons / M. Bakhtiari [et al.] // Radiation Physics and Chemistry. – 2020. – Vol. 177, iss. 14. – P. 109120. – DOI: [10.1016/j.radphyschem.2020.109120](https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109120).
17. Activation studies of a PET cyclotron bunker / S. Vichi [et al.] // Radiation Physics and Chemistry. – 2019. – Vol. 161. – P. 48–54. – DOI: [10.1016/j.radphyschem.2019.04.001](https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.04.001).
18. Neutron transport calculation for Activation Evaluation for Decommissioning of PET cyclotron Facility / F. Nobuhara [et al.] // EPJ Web of Conferences. – 2017. – Vol. 153, 04007. – DOI: [10.1051/epjconf/201715304007](https://doi.org/10.1051/epjconf/201715304007).

REFERENCES

1. Sunderland, J. J., Erdahl, C. E., Bender, B. R., Sensoy, L., & Watkins, G. L. (2012). Consideration, measurements and logistics associated with low-energy cyclotron decommissioning. *14th Intern. Workshop on Targetry and Target Chemistry. AIP Conf. Proc. V. 1509*. (16–20). DOI: [10.1063/1.4773931](https://doi.org/10.1063/1.4773931).
2. Dodd, A. C., Shackleton, R. J., Carr, D. A., & Ismail, A. (2017). Activation of air and concrete in medical isotope production facilities. *AIP Conference Proceedings: Vol. 1845*. DOI: [10.1063/1.4983537](https://doi.org/10.1063/1.4983537).
3. Da-yeong Gwon, Yong-min Kim, Kyu-young Jeong, Nam-suk Jung, & Hee-seock Lee. (2017). Study on the regulation improvement of domestic cyclotron decommissioning through the questionnaires on the current cyclotron operation status. In *Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting Jeju*. www.kns.org/files/pre_paper/37/17S-309권다연.pdf.
4. Shiomi, T., Azeyanagi Y., Yamadera, A., & Nakamura, T. (2000). Measurements of residual radioactivity of machine elements and concrete on the cyclotron decommissioning. *J. Nuclear Science Technology*, (1), 357–361.
5. Sonck, M., Buls, N., Hermanne, A., & Eggermont, G. (2000). Radiological and economic impact of decommissioning charged particle accelerators. In *IRPA-10: Proc. of the 10th intern. congress of the International Radiation Protection Association on harmonization of radiation, human life and the ecosystem* (1v). Hiroshima, Japan.
6. Spinney, G. (1992) Thoughts on decommissioning the CERN synchrocyclotron. In *Proc. of the 13th Intern. Conf. on Cyclotrons and their Applications* (47–49). Vancouver, BC, Canada. <https://accelconf.web.cern.ch/c92/papers/i-07.pdf>.
7. Eberl, S., Eriksson, T., Svedberg, O., Norling, J., Henderson, D., Lam, P., ... Fulham, M. (2012). Routine ^{18}F -production with 180 μA to 200 μA target beam current on a GE PETtrace 800 Cyclotron. In *AIP Conf. Proc.: Vol. 1509* (66–70). DOI: [10.1063/1.4773942](https://doi.org/10.1063/1.4773942).
8. Brinkevich, S. D., Brinkevich, D. I., & Kiiiko, A. N. (2020). Activation radionuclides in the process of irradiation of a niobium target at the Cyclone 18/9 HC cyclotron. *Physics of atomic nuclei*, 12(83), 1732–1737.
9. Vabishchevich, S. A., Vabishchevich, N. V., Brinkevich, D. I., Brinkevich, S. D., & Nevzorov, D. I. (2019). Plenki piroliticheskogo grafitá, obluchennogo ionami vodoroda N⁺ [Pyrolytic Graphite Films Irradiation with H⁺ Ions]. In V. V. Uglov (Eds.), *Vzaimodeistvie izluchenií s tverdyim telom [Interaction of Radiation with Solids]* (43–45). Minsk: Publ. BSU. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Guarino, P., Rizzo, S., Tomarchio, E., & Greco, D. (2007). Gamma-ray spectrometric characterization of waste activated target components in a PET cyclotron. *Cyclotrons and Their Applications–2007* (295–297). Giardini Naxos, Italy.
11. Brinkevich, D. I., Brinkevich, S. D., Baranovskii, O. A., Chizh, G. V., & Ivanyukovich, A. A. (2018). Dolgozhivushchie radionuklidy v proizvodstve 2-[^{18}F]ftordezoksiglyukozy [Long-lived radionuclides in the production of 2-[^{18}F]fluorodeoxyglucose]. *Meditsinskaya fizika [Medical physics]*, 1(77), 80–88. (In Russ., abstr. in Engl.).
12. Krot, V. O., Tugay, O. V., Brinkevich, D. I., Brinkevich, S. D., Chizh, G. V., & Vabishchevich, S. A. (2018). Obrashchenie s vodnymi radioaktivnymi otkhodami pri proizvodstve radiofarmpreparatov na osnove ^{18}F [Management of Aqueous Radioactive Wastes in the Production of ^{18}F -Labeled Radiopharmaceuticals]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, (4), 128–134. (In Russ., abstr. in Engl.).
13. Brinkevich, D. I., Maliborskij, A. Ya., & Brinkevich, S. D. Aktivatsiya vody kontura okhlazhdeniya tsiklotrona Cyclone 18/9 HC pri narabotke ^{18}F [Activation of cooling water for cyclotron Cyclone 18/9 HC at ^{18}F production]. *Yadernaya fizika i inzhiniring [Nuclear physics and engineering]*, 9(4), 404–410. DOI: [10.1134/S2079562918040024](https://doi.org/10.1134/S2079562918040024). (In Russ., abstr. in Engl.).
14. Kijko, A.N., Vabishchevich, S. A., Vabishchevich, N. V., & Brinkevich, D. I. (2022). Nakoplenie radionuklidov v smennykh detal'yakh i vodnoi misheni tsiklotrona [Accumulation of radionuclides in replaceable parts and water target cyclotron]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C, Fundamental'nye nauki [Herald of Polotsk State University. Series C. Fundamental sciences]*, 4(38), 69–80. (In Russ., abstr. in Engl.).
15. Biegała, M., & Jakubowska, T. (2020). Levels of exposure to ionizing radiation among the personnel engaged in cyclotron operation and the personnel engaged in the production of radiopharmaceuticals, based on radiation monitoring system. *Radiation Protection Dosimetry*, 189(1), 56–62. DOI: [10.1093/rpd/ncaa012](https://doi.org/10.1093/rpd/ncaa012).

16. Bakhtiari, M., Mokhtari Oranj, L., Jung, N.-S., Lee, A., & Lee, H.-S. (2020). Estimation of neutron production yields from H_2^{18}O as the ^{18}F -production target bombarded by 18-MeV protons. *Radiation Physics and Chemistry*, 177(14), R. 109120. DOI: [10.1016/j.radphyschem.2020.109120](https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109120).
17. Vichi, S., Zagni, F., Cicoria, G., Infantino, A., Riga, S., Zeller, M., ... Mostacci, D. (2019). Activation studies of a PET cyclotron bunker. *Radiation Physics and Chemistry*, (161), 48–54. DOI: [10.1016/j.radphyschem.2019.04.001](https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.04.001).
18. Nobuhara, F., Kuroyanagi, M., Masumoto, K., Nakamura, H., Toyoda, A. & Takahashi, K. (2017). Neutron transport calculation for Activation Evaluation for Decommissioning of PET cyclotron Facility. *EPJ Web of Conferences*, (153), 04007. DOI: [10.1051/epjconf/201715304007](https://doi.org/10.1051/epjconf/201715304007).

Поступила 07.09.2022

RADIOLOGICAL ASPECTS OF CYCLOTRON DECOMMISSIONING

A. KIYKO

(Belarusian State Institute of Metrology, Minsk);

S. VABISHCHEVICH, N. VABISHCHEVICH

(Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk);

D. BRINKEVICH

(Belarusian State University, Minsk)

In this paper, the radiological and economic issues of dismantling cyclotrons of various types, the accumulation of radionuclides in the details of the cyclotron itself, and the activation of the walls of the cyclotron bunker due to the capture of secondary neutrons are considered. As a result of (n,γ) -reactions on thermal neutrons, radionuclides ^{152}Eu , ^{60}Co , ^{46}Sc are formed in the concrete of the cyclotron bunker with a half-life of 2,6 to 14 years and an activity of 0,1–11 kBq/kg. The maximum of their distribution usually lies at a depth of 10–15 cm. In the details of the cyclotron and the metal infrastructure of the bunker, the main radionuclides are ^{54}Mn , ^{57}Co , ^{65}Zn . The analysis of the accumulation of long-lived radionuclides is of great importance for the design of new cyclotron facilities in order to ensure radiation safety and storage of radioactive waste and, as a result, to minimize the radiation exposure of personnel during the dismantling of the cyclotron.

Keywords: *cyclotron, decommissioning, radionuclides, neutron activation of concrete.*