

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 577.3:539.12.04

ПРОМЫШЛЕННЫЕ ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ И ^{14}C

Рублевский В.П. (ФМБЦ им. А.И. Бурназяна, г. Москва)

Целью настоящей статьи является оценка суммарного выброса ^{14}C остановленных промышленных уран-графитовых и тяжеловодных реакторов за время эксплуатации и его влияния на радиационную обстановку. Обсуждается приемлемый способ утилизации облученного графита с выделением ^{14}C в окружающую среду.

Экспериментальные исследования были проведены в 1964—1969 гг. [1]. Выбрасываемый газ отбирали прокачкой через барботер с раствором $\text{Ba}(\text{OH})_2$, улавливающим CO_2 . Получающийся порошок BaCO_3 перед радиометрическими измерениями очищали от посторонних радиоактивных и органических примесей. В этот же период определяли содержание ^{14}C в некоторых биологических объектах в районах расположения реакторов. Углерод биологических проб химическими методами переводили в бензол ($^{14}\text{C}_6\text{H}_6$) и измеряли жидкостным сцинтилляционным методом [2].

Из табл. 1 следует, что средний выброс ^{14}C составил, ГБк/сут: реакторами первого поколения А и АИ $8,5 \pm 2,6$, второго АВ-1, -2, -3 — $48,7 \pm 24,5$, И-1, ЭИ-2, АД-3 — $17,8 \pm 7,4$, АД, АДЭ-1, -2 — $18,5 \pm 3,7$. В августе 1965 г. и июле 1968 г. на АВ-1 были зарегистрированы два кратковременных выброса ^{14}C , которые превышали средний примерно в 10 раз: 270 и 460 ГБк/сут соответственно. Средний выброс ^{14}C тяжеловодных реакторов ОК-180 и -190М составил $48,2 \pm 27,1$ ГБк/сут. Как и на АВ-1, наблюдали два значительных, хотя и кратковременных выброса ^{14}C : в апреле 1965 г. — 1300, в августе 1968 г. — около 7800 ГБк/сут.

Суммарный выброс ^{14}C промышленных реакторов оценен за время их эксплуатации и с учетом коэффициента использования установленной мощности (КИУМ = 0,7). Выброс составил около 3560 ТБк, т.е. примерно 90 ТБк/год. Скорость образования естественного ^{14}C около 1350 ТБк/год, что в 15 раз больше.

Таблица 1. Выброс ^{14}C промышленными реакторами в период их эксплуатации [1]

Реактор	Площадка расположения	Период эксплуатации	Выброс	
			ГБк/сут	За период эксплуатации, 10^2 ТБк
А	ПО «Маяк»	1948—1987	$9,6 \pm 1,5$	$1,0 \pm 0,2$
АИ		1948—1987	$7,4 \pm 3,7$	$0,7 \pm 0,4$
АВ-1		1949—1988	$46,3 \pm 25,5$	$4,6 \pm 2,6$
АВ-2		1950—1989	$70,3 \pm 40,7$	$7,0 \pm 4,1$
АВ-3		1951—1990	$29,6 \pm 7,4$	$3,0 \pm 0,7$
ОК-180		1951—1966	$51,8 \pm 32,0$	$5,3 \pm 3,3$
ОК-190М		1966—1986	$44,4 \pm 22,1$	$4,5 \pm 2,3$
И-1	Сибирский химический комбинат	1955—1987	$20,4 \pm 7,4$	$2,4 \pm 0,7$
ЭИ-2			$14,8 \pm 1,2$	$1,4 \pm 1,0$
АД-3			$15,5 \pm 1,4$	$15,8 \pm 1,3$
АД	Горно-химический комбинат	1958—1992	$18,5 \pm 3,7^*$	$1,6 \pm 0,3$
АДЭ-1		1961—1992		$1,5 \pm 0,3$
АДЭ-2		1964—2010		$1,9 \pm 0,4$
Всего				$35,2 \pm 15,2$

*Усредненный выброс каждого реактора АД, АДЭ-1 и АДЭ-2 (при совместном измерении).

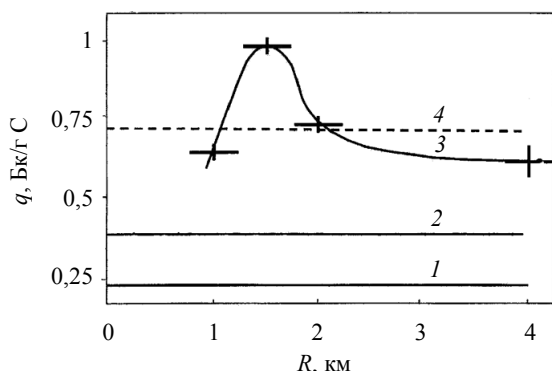
Следовательно, вклад выброса техногенного ^{14}C промышленных уран-графитовых и тяжеловодных реакторов в глобальный фон является малозначимым, но в то же время в региональный (локальный) может быть значительным.

Для оценки радиационной обстановки в районах размещения обследованных предприятий и контрольных точках были отобраны пробы некоторых биологических объектов и измерено содержание в них ^{14}C . Полученные результаты сравнивали с естественным содержанием ^{14}C в биообъектах 0,227 Бк/г С [3].

В районе расположения Горно-химического комбината в 1967 г. было отобрано 26 проб растительности (ветки и листья березы) на расстоянии от 1 до 4 км от вентиляционной трубы высотой 150 м в направлении господствующего ветра и 10 проб в двух контрольных районах: 45 км на северо-запад и около 80 км на юг от предприятия. На комбинате работали три реактора, суммарный выброс ^{14}C которых составлял около 55 ГБк/сут.

Содержание ^{14}C в пробах из контрольных районов — глобальный фон составило 0,35 Бк/г С и превышало естественный уровень (0,23 Бк/г С) в среднем на 60%, что в пределах ошибки совпадает с данными [4]. На рис. 1 видно, что максимальная концентрация техногенного ^{14}C (измеренная минус глобальный фон) обнаружена в пробах, отобранных на расстоянии 1,5 км от вентиляционной трубы. Она составила 0,6 Бк/г С, или 80% глобального и 160% естественного фона. На расстоянии 2 км оно снизилось примерно на 40% до 0,35 Бк/г С, 4 км — на 60% до 0,25 Бк/г С. Среднее содержание техногенного ^{14}C в растительности в радиусе 1—4 км составило 0,34 Бк/г С, что примерно равно глобальному фону и выше естественного в 1,5 раза.

В районе расположения ПО «Маяк» в 1968 г. было отобрано 115 проб растительности и пищевых продуктов в радиусе от 4 до 18 км и 11 проб в двух контрольных районах (120 км на север и 50 км на



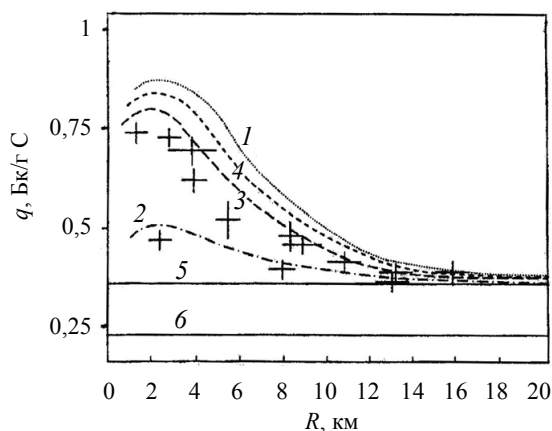
Р и с. 1. Измеренное содержание ^{14}C в растительности в районе размещения Горно-химического комбината как функция расстояния до источника: 1 — естественное содержание в биосфере; 2 — глобальный фон; 3 — содержание в пробах растительности; 4 — среднее содержание в растительности в радиусе 4 км

северо-восток). В период исследований на трех заводах работали шесть реакторов (без ОК-180), отстоящих от условного центра промплощадки примерно на расстоянии 1,5—2 км. Суммарный выброс ^{14}C составил ~180 ГБк/сут.

На рис. 2 видно, что содержание техногенного ^{14}C в отобранных пробах зависит не только от расстояния до объекта, но и от направления. Наибольшее количество обнаружено в пробах из сектора 1, расположенного в направлении господствующих ветров. Оно превышает содержание ^{14}C в пробах, отобранных в секторе 2 (в направлении наименьшей повторяемости ветров), в среднем в 3—4 раза. Максимальное количество может накапливаться в растительности на расстоянии около 2—3 км от центра промплощадки в направлении господствующего ветра — до 0,87 Бк/г С, что в 2 раза превышает его содержание в контрольном районе 0,36 Бк/г С и почти в 4 раза естественный уровень.

Пищевые продукты растительного происхождения накапливают ^{14}C , ассимилируя из воздуха углекислый газ, животного — при употреблении загрязненных кормов. При этом коэффициент перехода ^{14}C по всей пищевой цепочке до организма человека равен единице, если выразить его содержание в виде удельной (массовой) активности. Тканевая доза зависит не только от количества ^{14}C , поступившего в организм человека, но и от его удельной (массовой) активности в углеводе пищевых продуктов.

Измерения показали, что все виды растительности и мясо, отобранные в одном районе, накапливают почти одинаковое количество ^{14}C . Следовательно, можно предположить, что все пищевые продукты местного производства будут содержать такое же количество техногенного ^{14}C , как и отобранные пробы. Сельскохозяйственные культуры выращиваются на больших площадях, что приводит к некоторому усреднению содержания ^{14}C в конечном пищевом продукте. Поэтому для оценки дозы облучения насе-



Р и с. 2. Содержание техногенного ^{14}C в объектах окружающей среды в районе размещения ПО «Маяк» по четырем направлениям (1—4), в контрольных районах (5) и естественного (6)

ления содержание техногенного ^{14}C в отобранных пробах растительности было усреднено по расстоянию: 1—8 км при отсутствии санитарно-защитной зоны и 4—10 км при ее наличии. Оно составило 0,62 и 0,5 Бк/г С соответственно. Поступление техногенного ^{14}C в организм местных жителей оказалось равным $2 \cdot 10^4$ и $1,6 \cdot 10^4$ Бк/год соответственно.

Дозовые нагрузки на население оценены из предположения идентичности поведения и накопления техногенного и природного ^{14}C , а население рассматриваемого района питается только продуктами местного производства. Расчеты показали, что для этих условий максимальная эффективная доза облучения в районе от 1 до 8 км от источника в направлении господствующих ветров может достигать 33 мкЗв/год, усредненная по расстоянию от 4 до 10 км — 25 мкЗв/год, или 3,3 и 2,5% допустимой эффективной дозы для населения (1 мЗв/год) соответственно [5].

В графитовом замедлителе остановленных промышленных реакторов содержится значительное количество ^{14}C , которое может поступать в окружающую среду с большей или меньшей скоростью в зависимости от способа утилизации [6]. По разным оценкам такого облученного графита только на АЭС с РБМК к 2010 г. накоплено около 30 тыс. т. Всего облученного графита, включая промышленные реакторы, накоплено около 50 тыс. т [7, 8].

Возможны несколько способов его утилизации: глубинное захоронение в естественных или искусственных полостях, хранение в приповерхностных сооружениях (над землей — в зданиях, под землей — в подземных сооружениях, но над уровнем грунтовых вод), сжигание в специальных установках, долговременная консервация на месте активной зоны реакторов. Используя для утилизации сжигание, можно исключить хранение и захоронение больших объемов облученного графита с одновременным выбросом в атмосферу углекислого и угарного газов, меченных ^{14}C ($^{14}\text{CO}_2$ и ^{14}CO).

Рассмотрим преимущества и недостатки сжигания в специальных установках. Выброс ^{14}C при сжигании зависит от двух параметров: количества сожженного графита (производительности установки) и удельной активности. Первый параметр поддается варьированию и, следовательно, с его помощью можно обеспечить безопасный выброс в окружающую среду. Для этого достаточно оценить предельно допустимый выброс ^{14}C , который не приведет к превышению регламентированной дозовой нагрузки на организм человека (1 мЗв/год при поступлении в организм критической группы населения):

при поступлении в организм критической группы населения техногенного ^{14}C только с атмосферным воздухом предельно допустимый выброс не должен создавать в приземном слое атмосферы сред-

негодовую концентрацию, превышающую $\text{ДОО}_{\text{нас}} = 55 \text{ Бк/м}^3$ — его можно рассчитать по формулам [9, 10];

при поступлении в организм критической группы населения с пищевыми продуктами местного производства предельно допустимый выброс не должен привести к накоплению ^{14}C в углеводе пищевых продуктов, которое может превысить дозовую нагрузку на организм человека 1 мЗв/год. Для этого необходимо рассчитать его поступление с учетом местных метеорологических условий и режима питания.

В обоих случаях локальный выброс ^{14}C в виде углекислого и угарного газов ($^{14}\text{CO}_2$ и ^{14}CO) в атмосферу увеличивает не только его количество в окружающей среде, но и в какой-то мере концентрацию в углеводе биосферы.

Можно предложить экологически приемлемый метод сжигания облученного графита, который позволит выбрасывать в атмосферу техногенный ^{14}C в виде $^{14}\text{CO}_2$ и ^{14}CO без дополнительного воздействия на живые организмы, в том числе и на человека как в локальном, так и в глобальном масштабе, поскольку не увеличивает концентрацию в углеводе биосферы [6]. Этот метод основывается на специфическом воздействии ^{14}C на живые организмы и человека, которое определяется его содержанием в углеводе пищевых продуктов, т.е. концентрацией в стабильном углеводе биосферы. Удельная (массовая) активность углерода, обусловленная ^{14}C , почти сохраняется при его переходе по всей цепочке: CO_2 воздуха—углерод растений—углерод пищевых продуктов (растительного и животного происхождения)—углерод организма человека. И если удельная активность углерода при попадании в атмосферу техногенного ^{14}C не возрастает, то и его поступление в организм человека с углеродом воздуха и пищевых продуктов не увеличивается, так как поступление стабильного углерода почти постоянно и составляет 300 г/сут [11]. Следовательно, не будет и дополнительного радиационного воздействия.

Метод заключается в совместном сжигании облученного графита и какого-либо органического топлива, например, в топках тепловых электростанций. В органическом топливе углерод почти не содержит ^{14}C и к нему можно добавлять некоторое количество техногенного ^{14}C . При этом необходимо так подобрать объемы сжигаемых графита и органического топлива, чтобы в выбрасываемом в атмосферу CO_2 удельная (массовая) активность углерода, обусловленная ^{14}C , не превышала его естественной концентрации или концентрации глобального фона. Удельная концентрация естественного ^{14}C в атмосферной углекислоте составляет 227 Бк/кг С [3].

В табл. 2 приведен пример расчета производительности установки сжигания облученного графита активностью 370 ГБк/т для средних метеорологических

Т а б л и ц а 2. Производительность установки сжигания облученного графита, оценка предельно допустимого выброса ^{14}C и возможного влияния на загрязнение биосферы

Путь поступления	Выброс, Бк/сут	Скорость сжигания, т/год	Загрязнение биосферы
Воздушный	$4,3 \cdot 10^{13}$	$4,2 \cdot 10^5$	Глобальное и локальное
С пищевыми продуктами	$3,5 \cdot 10^{12}$	$3,6 \cdot 10^4$	То же
Отсутствует (при совместном сжигании с органическим топливом)	Не оценивается	1 т облученного графита + $1,64 \cdot 10^5$ т угля	Отсутствует

ких условий, высоты трубы 100 м, исходя из воздушного и перрорального путей поступления ^{14}C в организм критической группы населения и возможного влияния выброса на загрязнение биосферы. Видно, что при совместном сжигании облученного графита и ископаемого топлива скорость зависит только от мощности тепловой станции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рублевский В.П. Атомные реакторы как источники загрязнения окружающей среды углеродом-14. Дис. на соискание ученой степ. канд. техн. наук. ИБФ МЗ СССР, 1971.
2. Рублевский В.П., Голенецкий С.П., Кирдин Г.С. Радиоактивный углерод в биосфере. М.: Атомиздат, 1979.
3. Распределение естественного и искусственного углерода-14 и создаваемые им тканевые дозы. НКДАР ООН, 1969.
4. Радиоактивные загрязнения в результате ядерных взрывов. НКДАР ООН, 17 июня 1975 г.
5. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. СанПиН 2.6.1.2523-09.
6. Рублевский В.П., Яценко В.Н., Чанышев Е.Г. Роль углерода-14 в техногенном облучении человека. М.: ИздАТ, 2004.
7. Скачек М.А. Обращение с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами АЭС. Учебное пос. для вузов. М.: Изд. дом МЭИ, 2007. 448 с.
8. Роменков А. Достигнутые результаты. Обращение с радиоактивным графитом при выводе из эксплуатации уран-графитовых реакторов с использованием технологии окисления графита в расплаве солей. — Бюл. Росэнергоатома, 2011, № 3, с. 32—35.
9. Ширяев Ф.З., Карпов В.И., Крупчатников В.М. и др. Охрана окружающей среды на предприятиях атомной промышленности. Под ред. Б.Н. Ласкорина. М.: Энергоиздат, 1982.
10. Теверовский Е.Н., Артемова Н.Е., Бондарев А.А. и др. Допустимые выбросы радиоактивных и химических веществ в атмосферу. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1985.
11. Человек. Медико-биологические данные. Публикация 23 МКРЗ. М.: Медицина, 1977.

Поступило 24.02.11

В окончательной редакции 18.05.12

УДК 539.125.5:621.384.6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАКЕТА ГЕНЕРАТОРА НЕЙТРОНОВ НА БАЗЕ ДИОДА С КОЛЛЕКТИВНЫМ УСКОРЕНИЕМ ДЕЙТРОНОВ ИМПУЛЬСНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПОТОКОМ

Козловский К.И., Рыжков В.И., Цыбин А.С., Шиканов А.Е. (НИЯУ МИФИ, г. Москва)

Для дистанционного обнаружения и идентификации скрытых опасных предметов, элементного анализа вещества по времени пролета нейтронов неупругого рассеяния, тестирования регистрирующей аппаратуры для термоядерных исследований с инерциальным удержанием плазмы, изучения быстро протекающих процессов методами нейтронной томографии требуются малогабаритные излучатели, способные генерировать импульсы быстрых нейтронов с малой длительностью 1—100 нс [1]. Расчеты и эксперименты показали, что нейтронные поля с такой временной структурой можно генерировать с помощью обращенных диодов с коллективным ускорением дейтронов в прямых импульсных электронных потоках [2—4].

Главным условием ускорения является запирающее электронного потока в цилиндрической трубке дрейфа собственным объемным зарядом, сопровождаемое образованием виртуального катода и продольной электростатической потенциальной ямы, в которую захватываются дейтроны [5]. Для этого необходимо, чтобы электронный ток превышал некоторое критическое значение, определяемое отношением радиусов трубки дрейфа и электронного пучка χ , а также относительной энергией электронов γ :

$$I_{\text{кр}} = I_A \frac{(\gamma^{2/3} - 1)^{3/2}}{1 + 2 \ln \chi},$$

где $I_A = 17,09$ кА — ток Альвена. При этом выполняется неравенство