

УДК 621:504.61:539.1.04

PACS 28.50.Hw

ВКЛАД АЭС С РАЗЛИЧНЫМ ТИПОМ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК В ГЛОБАЛЬНОЕ ПОСТУПЛЕНИЕ ТРИТИЯ В ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Десятов Д.Д., Екидин А.А.

(ФГБУН «Институт промышленной экологии», УрО РАН, г. Екатеринбург),

Власов Д.А.

(ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург)

Контакты: Денис Дмитриевич Десятов; desyatovdenis1995@gmail.com

Суммарное загрязнение экосферы тритием из антропогенных источников, многократно превосходящее его природный уровень, — актуальная стратегическая задача по управлению снижением загрязнения.

Цель работы — оценка вклада АЭС с различными типами реакторных установок в глобальное поступление трития в экосферу.

Материалы и методы. Собран и проанализирован большой массив данных (более 6 тыс. записей) по удельным и абсолютным показателям годовых выбросов и сбросов трития, поступающего в окружающую среду от АЭС со всеми типами реакторов и от других источников в мире. Статистический анализ данных проведен в программных пакетах Microsoft Excel и Statistica.

Результаты. Определены статистические характеристики удельных показателей выбросов и сбросов трития для всех типов действующих реакторов. Из них наибольший удельный показатель выброса отмечен для АЭС с реакторами типа PHWR, сброса — с AGR, наименьшие удельные показатели выброса и сброса — с РБМК, включая ЭГП. Поступление в экосферу трития при штатной эксплуатации АЭС на 61% обусловлено сбросами. Наибольший вклад в глобальные экосферные сбросы (более 40%), а также выбросы (более 99%) вносят АЭС с PHWR. Реакторы-размножители БН, по сравнению с другими типами установок, существенного вклада в загрязнение экосферы тритием не вносят.

Заключение. Накопленная активность трития от выбросов и сбросов при нормальной эксплуатации рассмотренных АЭС за период 1970–2022 гг. составляет менее 10% от уровня природного трития и менее 2% от уровня, обусловленного испытаниями ядерного и термоядерного оружия.

Ключевые слова: загрязнение экосферы, радионуклид тритий (Т), выбросы и сбросы АЭС, реакторная установка (РУ), выброс трития, активность трития, суммарная активность трития, тип реактора, радиоактивное загрязнение окружающей среды, нормальная эксплуатация, загрязнение тритием

Для цитирования: Десятов Д.Д., Екидин А.А., Власов Д.А. Вклад АЭС с различным типом реакторных установок в глобальное поступление трития в окружающую среду. — Атомная энергия, 2024, т. 137, вып. 3–4, с. 175–180.

Финансирование. Работы выполнялись без внешнего финансирования.

Потенциальный конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Исследования радиационного воздействия трития (Т) на человека и биологические объекты сохраняют свою актуальность. Общее число таких работ, опубликованных с 1951 г., составило ок. 370 тыс., из них ок. 5 тыс. на русском языке [1]. Разработка и реализация стратегии по управлению снижением загрязнения окружающей среды, вызванного ростом применения ядерных технологий и накопления Т, нуждаются в знании параметров выброса и сброса Т (абсолютных и удельных, на единицу продукции) в нормальных условиях эксплуатации источников для использования в регулирующей деятельности.

Равновесное содержание природного Т на сегодняшний день оценивается от $9,0 \cdot 10^{17}$ до $2,6 \cdot 10^{18}$ Бк [2, 3]. Антропогенные источники поступления Т в атмосферу и гидросферу многократно превосходят естественные [4]. Испытания ядерного и термоядерного оружия в 1945–1975 гг. привели к повышению содержания Т в окружающей среде, по разным оценкам, до $(1,7–3,0) \cdot 10^{20}$ Бк [2–4]. Крупные радиационные аварии на объектах способствовали увеличению содержания Т в экосфере более чем на $4,24 \cdot 10^{16}$ Бк: предприятие по хранению и переработке радиоактивных отходов «Саванна Ривер» (США, 1970–1984 гг.) —

на $2,8 \cdot 10^{16}$ [5]; национальная лаборатория «Ливермор» (США, 1970 г.) — на $1,1 \cdot 10^{16}$ [5]; АЭС «Фукусима-1» (Япония, 2011 г.) — на $3,4 \cdot 10^{15}$ [6]; Чернобыльская АЭС (СССР, 1986 г.) — на $3,7 \cdot 10^{13}$ [7].

Предприятия по переработке отработавших ядерных отходов способствуют росту содержания Т в экосфере прил. на $6,4 \cdot 10^{16}$ Бк/год [8]. На основе данных о выбросах Т можно оценить поступление Т в атмосферу в результате деятельности предприятий по его наработке (например, на «Саванна Ривер» — от $1,4 \cdot 10^{16}$ до $9,9 \cdot 10^{16}$ Бк при среднем ежегодном выбросе $4,1 \cdot 10^{16}$ Бк [9]).

Уверенное развитие термоядерных технологий в перспективе потребует кратного увеличения производства Т, что будет способствовать росту его глобального содержания во всех средах. Ожидается, что ежедневное поступление Т в экосферу при нормальной эксплуатации одного термоядерного реактора номинальной мощностью 1000 МВт составит $5 \cdot 10^{17}$ Бк [3], а ежегодное — $1,8 \cdot 10^{20}$ Бк.

Цель настоящего исследования — оценить вклад АЭС с различными типами реакторных установок (РУ) в глобальное поступление трития в экосферу.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Доминирующий радионуклид в выбросах и сбросах атомных электростанций в режиме нормальной эксплуатации – Т, он поступает в окружающую среду с жидкими сбросами и газообразными выбросами. На отдельных АЭС поступление Т в атмосферу происходит обоими путями – от организованных источников (трубы вентиляционной системы) и неорганизованных (брызгальные бассейны и технологические водоемы) [10].

Проведены поиск, выбор и анализ значительно-го массива данных (более 6 тыс. записей) о годовой активности Т в сбросах и выбросах АЭС со всеми типами реакторов при нормальной эксплуатации, а также об удельных показателях (с учетом годового производства электроэнергии). Использовали в расчетах значения ежегодных сброса и выброса АЭС: 66 станций в США, 2005–2022 гг. [11], 10 – в России, 2008–2022 гг. [12], 55 – в Европе, 1995–2022 гг. [13], а также характеристики ряда станций из базы данных МАГАТЭ за 1985–2021 гг. [14]. Ранее выполненное соавторами исследование было основано только на данных о выбросах европейских АЭС за 1995–2015 гг. [4].

Глобальное поступление Т за всю историю применения АЭС с определенным типом РУ определяли на основе рассчитанных удельных показателей ($Q_{\text{уд}}$, ГБк/(ГВт·ч)) выброса ($p = 1$) и сброса ($p = 2$) Т на единицу произведенной электроэнергии в i -й год j -й АЭС. Для расчета этих показателей сформировали выборки из 2898 и 3096 записей об активности годовых выбросов и сбросов Т конкретных действу-

ющих АЭС (ГБк/год) соответственно. Учитывали такие же данные по выведенным из эксплуатации АЭС за период их работы. Сформированные выборки многолетних данных о выбросах и сбросах Т при нормальной эксплуатации АЭС России, Европы и США позволили получить отношение годовых выбросов и сбросов Т на соответствующей АЭС к годовому производству электроэнергии (данные из базы данных МАГАТЭ «Информационная система по энергетическим реакторам» (PRIS) [15]).

Собранные данные анализировали при помощи статистических методов обработки в программных пакетах Microsoft Excel и Statistica.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка удельных показателей выбросов и сбросов трития

В качестве меры выбросов и сбросов Т рассматривали активность (ГБк/год), нормированную на произведенную электрическую энергию (ГВт·ч) за этот же период. Количество исследуемых станций с определенным типом РУ, а также оценка средних значений удельных показателей выбросов и сбросов Т на станциях представлены в табл. 1.

Из 197 рассмотренных 66 станций находится в США. Водно-водяные реакторы под давлением PWR (от англ. Pressurized Water Reactor), включая водно-водяные энергетические реакторы (ВВЭР) составили большую часть (59%) от всех типов РУ в выборке.

В табл. 2 представлена зависимость средних и медианных значений удельных показателей выбросов и сбросов Т от типа реактора.

Таблица 1. Характеристика стран по числу АЭС, типам реакторных установок и удельным показателям выброса и сброса трития

Страна	Тип реактора	Число АЭС	Q , ГБк/(ГВт·ч)	
			выброса Т	сброса Т
Великобритания	GCR	6	$2,67 \cdot 10^1$	$6,84 \cdot 10^{-1}$
	GCR (AGR)	7	$3,37 \cdot 10^{-1}$	$4,08 \cdot 10^1$
	PWR	1	$9,16 \cdot 10^{-2}$	4,75
Аргентинская Республика	PHWR	2	$2,53 \cdot 10^2$	$2,22 \cdot 10^2$
Королевство Бельгия	PWR	2	$2,21 \cdot 10^{-1}$	2,06
Республика Болгария	ВВЭР	1	$3,44 \cdot 10^{-2}$	1,51
Федеративная Республика Бразилия	PWR	1	$3,22 \cdot 10^{-1}$	5,14
Венгрия	ВВЭР	1	$2,62 \cdot 10^{-1}$	1,77
Федеративная Республика Германия	BWR	5	$2,04 \cdot 10^{-2}$	$1,56 \cdot 10^{-1}$
	PWR	13	$5,76 \cdot 10^{-2}$	1,76
Республика Индия	PHWR	2	$7,64 \cdot 10^2$	$3,73 \cdot 10^1$
Королевство Испания	BWR	2	$1,85 \cdot 10^{-1}$	$9,78 \cdot 10^{-2}$
	PWR	5	$1,41 \cdot 10^{-1}$	3,15
Канада	PHWR	5	$4,06 \cdot 10^1$	$3,69 \cdot 10^1$
Китайская Народная Республика	BWR	2	$1,18 \cdot 10^{-1}$	$1,65 \cdot 10^{-1}$
	PWR	3	$2,33 \cdot 10^{-1}$	1,68

Страна	Тип реактора	Число АЭС	Q, ГВт/(ГВт·ч)	
			выброса Т	сброса Т
Литовская Республика	РБМК	1	$5,67 \cdot 10^{-4}$	$1,15 \cdot 10^{-1}$
Мексиканские Соединенные Штаты	BWR	1	$7,79 \cdot 10^{-2}$	$7,99 \cdot 10^{-2}$
Королевство Нидерландов	BWR	1	$7,61 \cdot 10^{-2}$	$1,25 \cdot 10^{-1}$
	PWR	1	$7,30 \cdot 10^{-2}$	1,74
Российская Федерация	БН	1	$4,61 \cdot 10^{-3}$	$1,14 \cdot 10^{-1}$
	ВВЭР	5	$3,19 \cdot 10^{-1}$	$6,89 \cdot 10^{-1}$
	РБМК+ЭГП	4	$1,16 \cdot 10^{-2}$	$1,63 \cdot 10^{-1}$
Румыния	PHWR	1	$3,28 \cdot 10^1$	$1,81 \cdot 10^1$
Словацкая Республика	ВВЭР	2	$1,02 \cdot 10^{-1}$	1,41
Республика Словения	PWR	1	$8,16 \cdot 10^{-1}$	2,37
Соединенные Штаты Америки	BWR	24	$2,38 \cdot 10^{-1}$	$1,63 \cdot 10^{-1}$
	PWR	42	$3,02 \cdot 10^{-1}$	3,36
Украина	ВВЭР	2	—	$1,01 \cdot 10^{-1}$
Финляндская Республика	BWR	1	$3,92 \cdot 10^{-2}$	$1,18 \cdot 10^{-1}$
	ВВЭР	1	$2,60 \cdot 10^{-2}$	1,86
Французская Республика	PWR	19	$7,61 \cdot 10^{-2}$	2,35
	БН	1	—	$1,86 \cdot 10^{-1}$
Чешская Республика	ВВЭР	2	$1,63 \cdot 10^{-1}$	2,11
Швейцарская Конфедерация	BWR	2	$5,94 \cdot 10^{-2}$	$1,20 \cdot 10^{-1}$
	PWR	2	—	4,13
Королевство Швеция	BWR	4	$3,34 \cdot 10^{-2}$	$9,16 \cdot 10^{-2}$
	PWR	1	$8,36 \cdot 10^{-2}$	1,82
Южно-Африканская республика	PWR	1	$3,97 \cdot 10^{-1}$	2,00
Республика Корея	PWR	3	$2,56 \cdot 10^{-1}$	3,15
	PHWR	1	$6,57 \cdot 10^1$	3,77
Япония	BWR	8	$6,76 \cdot 10^{-2}$	$2,96 \cdot 10^{-1}$
	PWR	7	$3,11 \cdot 10^{-1}$	3,14

Таблица составлена авторами на основе данных из [11–15]

Примечание. В качестве основной меры выбросов и сбросов использовали активность Т. Q — удельные показатели выброса и сброса трития (Т), нормированные на единицу произведенной электроэнергии за тот же период. Типы реакторов: АGR — усовершенствованный газоохлаждаемый графитовый; BWR — кипящий водно-водяной; GCR — газоохлаждаемый графитовый; PHWR — тяжеловодный; PWR — водно-водяной под давлением; БН — реактор-размножитель на быстрых нейтронах; ВВЭР — водно-водяной энергетический; РБМК — большой мощности канальный; ЭГП — энергетический гетерогенный петлевой. «—» — нет сведений. Представленные данные [11–15] относятся к 1985–2022 гг.

Средняя оценка удельных показателей — выброса (для каждого типа РУ) и сброса Т (за исключением ВВЭР и усовершенствованного газоохлаждаемого графитового реактора АGR (от англ. Advanced Gas Cooled Reactor)), превышает соответствующие медианные значения. В качестве основной количественной меры выбросов и сбросов Т далее использовали медиану как более устойчивую к статистическим выбросам по сравнению со средним значением. Сравнивая медианы, можно заметить, что удельный показатель сброса Т (на единицу электроэнергии) больше, чем таковой выброс, для всех типов РУ, за исключением трех: кипящего водно-водяного реактора BWR

(от англ. Boiling Water Reactor), газоохлаждаемого графитового GCR (от англ. Gas Cooled Reactor) и тяжеловодного PHWR (от англ. Pressurized Heavy Water Reactor). Наибольший удельный показатель выброса отмечен для PHWR, а сброса — для АGR, наименьшие удельные показатели выброса и сброса — для канального реактора большой мощности (РБМК), включая энергетический гетерогенный петлевой (ЭГП). Отметим, что снижение выбросов АGR, по сравнению с GCR, могло быть вызвано увеличением сбросов. Медианные значения удельных показателей выбросов и сбросов хорошо соотносятся с ранее опубликованными данными [3, 4].

Таблица 2. Среднее значение и медиана удельных показателей выброса и сброса трития на АЭС в зависимости от типа реактора

Тип реактора	Q , ГБк/(ГВт·ч)			
	выброса Т		сброса Т	
	среднее значение	медиана	среднее значение	медиана
PWR	0,19	0,09	2,73	2,26
BWR	0,17	0,08	0,16	0,07
ВВЭР	0,15	0,07	1,40	1,45
РБМК+ЭГП	0,01	$9 \cdot 10^{-4}$	0,15	0,01
GCR	26,66	0,59	0,68	0,43
GCR (AGR)	0,34	0,22	40,82	40,85
PHWR	164,46	40,53	70,85	27,14
БН	$4,01 \cdot 10^{-3}$	$3,79 \cdot 10^{-3}$	0,12	0,09

Таблица составлена авторами на основе данных из [11–15]

Примечание. См. прим. к табл. 1.

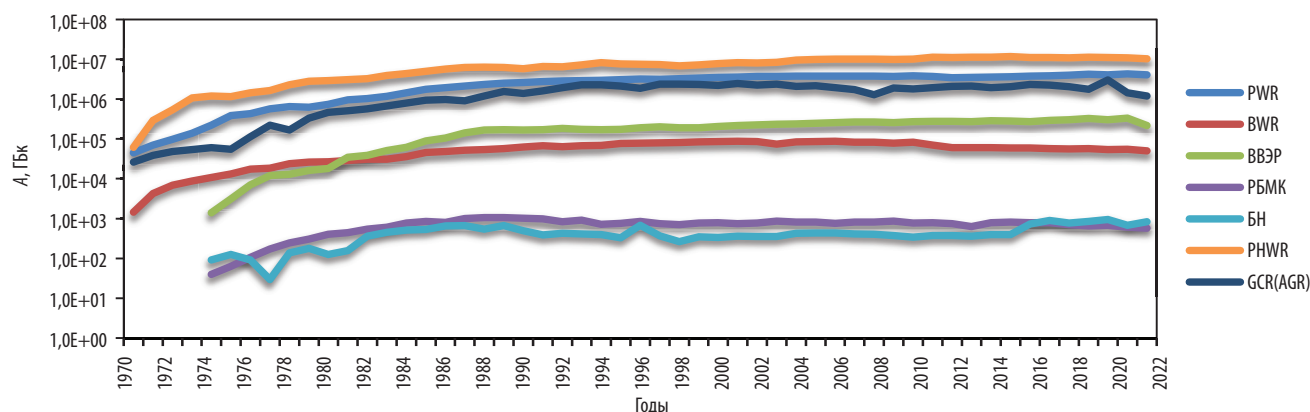


Рисунок составлен авторами на основе данных из [11–15]

Рис. 1. Динамика поступления (A) в окружающую среду трития с выбросами и сбросами при нормальной эксплуатации АЭС с разными типами реакторов за 1970–2022 гг. A представлено в виде медианных значений активности трития

Оценка поступления в окружающую среду трития от выбросов и сбросов АЭС за 1970–2022 гг.

На рис. 1 представлена динамика ежегодного суммарного поступления в экосферу Т от выбросов и сбросов при нормальной эксплуатации АЭС для каждого типа РУ.

На протяжении всего рассматриваемого периода (см. рис. 1) наибольший вклад в поступление Т в экосферу от сбросов и выбросов обусловлен РУ PHWR, а вклад GCR (включая AGR) и PWR примерно сопоставим. После 1980 г. вклад ВВЭР превысил таковой BWR. Реакторы-размножители на быстрых нейтронах (БН) и РБМК существенного вклада в поступление Т в окружающую среду, по сравнению с другими типами реакторов, не вносят.

Для консервативной оценки накопления активности Т в окружающей среде необходимо учитывать радиоактивный распад. Накопленную к 2022 г. (с учетом распада) активность Т, поступившего от выбросов и сбросов каждой РУ за весь период эксплуатации, рассчитывали по формуле:

$$A_{\Sigma} = \sum_{j=1970}^{2022} A_{ijp} \times \exp\left(-\frac{\ln(2) \times t_{ij}}{T_{1/2}}\right), \quad (1)$$

где A_{ijp} – поступление Т от выбросов ($p = 1$) и сбросов ($p = 2$) в окружающую среду i -й станцией за j -й год, ГБк/год; t_{ij} – эксплуатация i -й станции, год.

На рис. 2 представлен вклад различных типов реакторных установок в накопление Т в экосфере от выбросов и сбросов.

Наибольший вклад в накопленную активность Т по сравнению с другими РУ в окружающую среду от выбросов (ок. 96%) и сбросов (ок. 41%) вносит PHWR. Несмотря на то что вклады PWR (включая ВВЭР) и GCR (включая AGR) в выбросы Т в атмосферу малы (менее 3%), вклады в сбросы составляют 38% и 20% соответственно. Вклады в накопленную активность от суммы выбросов и сбросов Т распределяются следующим образом: PHWR – 62%, PWR (включая ВВЭР) – 23%, GCR (включая AGR) – 13%, вклад остальных РУ не превышает 2%.

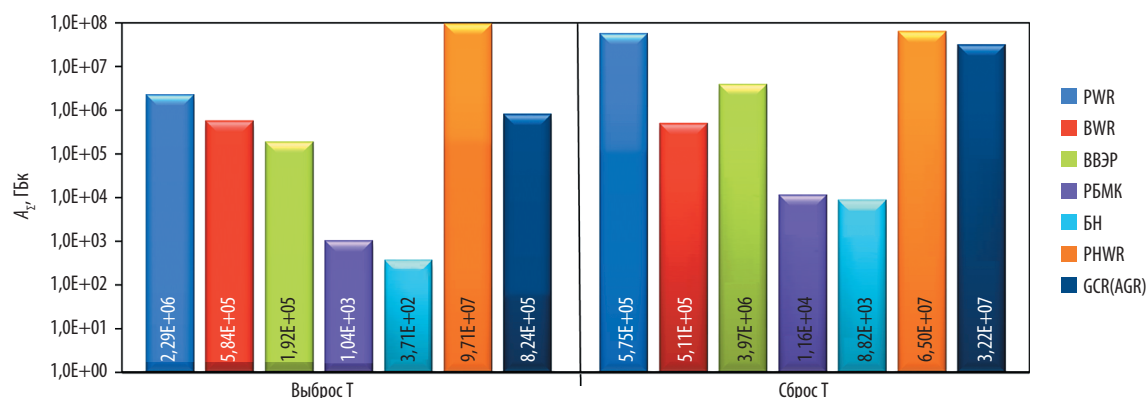


Рисунок составлен авторами на основе данных из [11–15]

Рис. 2. Вклад различных типов РУ в суммарное накопление (A_T) в экосфере активности трития (Т) от выбросов и сбросов АЭС за весь период нормальной эксплуатации (с учетом его распада). A_T представлено в виде медианных значений суммарной активности, накопленной к 2022 г.

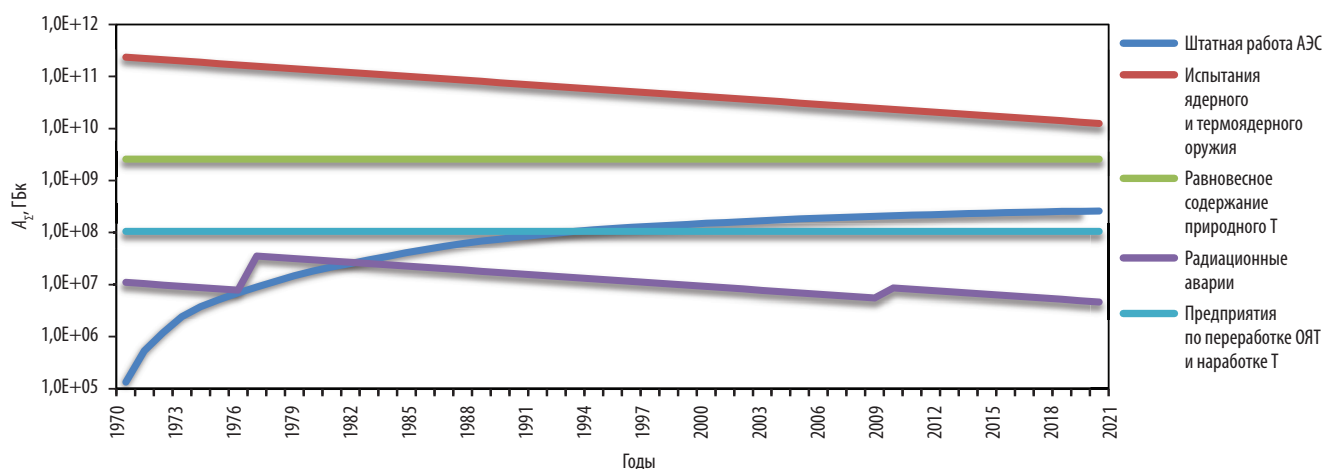


Рисунок составлен авторами на основе данных из [11–15]

Рис. 3. Сравнительная диаграмма активности (А) трития (Т), поступающего в окружающую среду от разных источников, в том числе из природного. ОЯТ – отработавшие ядерные отходы. А – в виде медианных значений

На рис. 3 представлено сравнение активности Т, поступившего в экосферу из разных источников, а также природного Т. При расчете активности Т, поступившего при нормальной эксплуатации АЭС, использована формула (1).

Из диаграммы на рис. 3 видно, что на сегодняшний день наибольший вклад в суммарную активность Т в окружающей среде вносят испытания ядерного и термоядерного оружия, пик которых приходился на середину XX в.; радиационные аварии существенного вклада не внесли. Рассчитанные значения выбросов и сбросов Т АЭС в сумме составляют менее 10% от равновесного содержания природного Т и менее 2% от уровня, обусловленного испытаниями ядерного и термоядерного оружия. Для того чтобы активность Т от выбросов и сбросов АЭС была сопоставима с естественной, необходимо 235-кратное увеличение производства электроэнергии на АЭС (до $5,84 \cdot 10^8$ ГВт·ч) по сравнению с сегодняшним днем. Потребуется еще 70 лет для распада оружейного Т до уровня активности, обусловленной нормальной эксплуатацией АЭС при сохранении сегодняшнего уровня производства электроэнергии ($2,49 \cdot 10^6$ ГВт·ч). Только к 2038 г. накопленный

в экосфере Т от испытаний ядерного оружия (с учетом радиоактивного распада) будет сопоставим с естественным уровнем Т.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получены статистические характеристики удельных показателей сбросов и выбросов для каждого типа РУ в результате проведенного поиска (массив данных более 6 тыс. записей) и статистического анализа данных – годовой активности Т в сбросах и выбросах АЭС со всеми типами реакторов при нормальной эксплуатации, а также удельных показателей выброса и сброса (с учетом годового производства электроэнергии).

Оценка поступления Т в окружающую среду в результате эксплуатационных выбросов и сбросов АЭС показала, что на 61 % это поступление обусловлено сбросами.

Провели сравнительный анализ данных, рассчитанных для всех типов реакторов. Удельные показатели выразили через активность Т, нормированную на единицу вырабатываемой энергии в ГБк/(ГВт·ч): наибольшее значение удельного показателя выброса (40,53) наблюдалось для реакторов типа PHWR,

наименьшее ($9 \cdot 10^{-4}$) – для РБМК+ЭГП; наибольшее значение удельного показателя сброса (40,85) – для АGR, наименьшее (0,01) – для РБК+ЭГП.

Наибольший вклад в накопленную к настоящему времени активность Т в сбросах (более 40%) и выбросах (более 99%) вносят АЭС с PHWR, их вклад по суммарному накоплению Т (от выбросов и сбросов) составляет 62%. Несмотря на то что АЭС с PWR (включая VVER) производят основное количество электро-

энергии в мире, их вклад в общую накопленную активность Т от выбросов и сбросов всего 23%.

Суммарная активность выбросов и сбросов Т при нормальной эксплуатации рассмотренных АЭС мира, накопленная с 1970 по 2022 г., равна $2,59 \cdot 10^8$ ГБк, что в 100 раз больше, чем при радиационных авариях, и составляет менее 10% от равновесного содержания природного Т и менее 2% от уровня, обусловленного испытаниями ядерного и термоядерного оружия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Антонова Е.В., Антонов К.Л., Васянович М.Е., Панченко С.В. Тритий от молекулы до биосферы. 1. Закономерности поведения в окружающей среде. – Экология, 2022, № 4, с. 255–288.
DOI: 10.31857/S0367059722040035
2. Куделя С.А., Малышевский В.С., Фомин Г.В. Производство и перенос космогенного трития в земной атмосфере в модели PARMA. – Глобальная ядерная безопасность, 2024, т 14, № 1 (50), с. 17–21.
DOI: 10.26583/gns-2024-01-02
3. Investigation of the environmental fate of Tritium in the atmosphere. Part of the Tritium Studies Project. CC172-51/2009E-PDF, INFO-0792. Ottawa: CNSC, 2009, 104 p.
4. Десятов Д.Д., Екидин А.А. Оценка поступления трития в окружающую среду от выбросов АЭС. – Биосферная совместимость: человек, регион, технологии, 2018, № 1 (21), с. 88–96.
EDN: XOAMDB
5. Okada S., Momoshima N. Overview of tritium: characteristics, sources, and problems. – Health Physics, 1993, v. 65, № 6, p. 595–609.
DOI: 10.1097/00004032-199312000-00001
6. Hou X. Tritium and ^{14}C in the environment and nuclear facilities: Sources and analytical methods. – JNFCWT, 2018, v. 16, № 1, p. 11–39.
DOI: 10.7733/jnfcwt.2018.16.1.11
7. Koga T., Morishima H., Niwa T., Kawai H. Tritium precipitation in European cities and in Osaka, Japan owing to the Chernobyl nuclear accident. – J. Radiat. Res., 1991, v. 32, № 3, p. 267–276.
DOI: 10.1269/jrr.32.267
8. Михальченко А.Г., Ивахнюк Г.К., Швецова О.В. Перспективы увеличения глобальной радиационной нагрузки от техногенного трития. – В сб.: XIV Межд. науч.-техн. конф. «Современные проблемы экологии». Тула: Инновационные технологии, 2016. с. 263–264.
9. Murphy C.E.Jr., Pendergast M.M.; Du Pont de Nemours (E.I.) and Co., Savannah River Lab. Savannah River Plant (Environmental transport and cycling of tritium in the vicinity of atmospheric releases). – In: Proc. of Intern. Sym. on the Behaviour of Tritium in the Environment. San Francisco (USA), Oct. 16–20, 1978. CONF-781029-4; IAEA-SM-232/80. Vienna: IAEA, 1979.
10. Екидин А.А., Антонов К.Л., Васянович М.Е., Десятов Д.Д. Влияние метеопараметров на интенсивность выброса трития из брызгальных бассейнов. – Атомная энергия, 2023, т. 135, № 5–6, с. 232–239.
EDN: MKFFBU
11. United States Nuclear Regulatory Commission. URL: <https://www.nrc.gov/reactors/power.html> (дата обращения: 09.02.2024).
12. Экологические отчеты АО «Концерн Росэнергоатом». URL: https://www.rosenergoatom.ru/safety_environment/vozdeystvie-na-okruzhayushchuyu-sredu/ekologicheskie-otchety-ao-kontsern-rosenergoatom/ (дата обращения 27.12.2023).
13. European Commission RAdioactive Discharges Database. URL: <https://europa.eu/radd/> (дата обращения: 24.01.2024).
14. The IAEA database on discharges of radionuclides to the atmosphere and the aquatic environment. URL: https://dirata.iaea.org/discharges_data.html (дата обращения: 24.01.2024).
15. The Power Reactor Information System (PRIS). URL: <https://www.iaea.org/PRIS> (дата обращения: 24.01.2024).

Вклад авторов

Все авторы подтверждают соответствие своего авторства критериям ICMJE. Все авторы участвовали в разработке концепции исследования, написании текста рукописи, формулировке выводов.

Идентификаторы авторов

Десятов Денис Дмитриевич: SPIN-код 6486-9325; AuthorID 1148581

Екидин Алексей Акимович: SPIN-код 8795-3160, AuthorID 119046