

ПРЕИМУЩЕСТВА ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ПО КРИТЕРИЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ

Иванов В.К., Адамов Е.О., Лопаткин А.В. (АО «Прорыв», Москва, Россия)

Введение

Электроэнергия, производящаяся на атомных станциях, в настоящее время составляет небольшую часть ее общемирового производства. Несмотря на то что ядерное топливо характеризуется наиболее высокой удельной энергией на единицу массы, проблемы обращения с облученным ядерным топливом (ОЯТ) современных реакторов на тепловых нейтронах (тепловых реакторов – ТР) в настоящее время тормозят дальнейшее развитие ядерной энергетики (ЯЭ). Неизбежное долговременное контролируемое хранение ОЯТ ТР и захоронение долгоживущих высокоактивных отходов (ДВАО) приводят к накоплению ОЯТ и ДВАО в мировом масштабе, т. е. к росту глобальной экологической опасности ЯЭ.

Развитие двухкомпонентной ядерной энергетики в виде ТР и реакторов на быстрых нейтронах (быстрых реакторов – БР), работающих в замкнутом ядерном топливном цикле (ЗЯТЦ), может существенно снизить опасность ЯЭ.

Большое внимание изучению радиоактивных отходов (РАО), которые могут образовываться в ЗЯТЦ, оказывается на уровне Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) в рамках Международного проекта по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам (ИНПРО), а международный форум «Поколение IV» отметил перспективность разработки БР (в частности БР со свинцовым теплоносителем) и соответствующих технологий ЗЯТЦ на ближайшие 15–25 лет [1].

При реализации ЗЯТЦ значительно сокращаются объемы ОЯТ и ДВАО, однако полностью безотходного процесса добиться не удастся и геологическое захоронение РАО по-прежнему является необходимым.

В настоящее время в РФ создается крупномасштабная ЯЭ на основе ЗЯТЦ, в которых проблема РАО решается на основе достижения такого состава и количества РАО (и их захоронения), для которых их потенциальная опасность для здоровья человека будет эквивалентна или менее опасности потребляемых ЯЭ природных радиоактивных изотопов урана [2–4].

Потенциальную опасность для здоровья человека можно оценивать по ожидаемым эффективным дозам [5] (в случае реализации принципа радиационной эквивалентности) или, более корректно, вычисляя пожизненный атрибутивный риск (LAR) индукции онкологических заболеваний человека в результате поступления в организм радионуклидов на основе современных моделей радиационных рисков, рекомендованных Международной комиссией по радиологической защите (МКРЗ) [5] (в случае реализации радиологической эквивалентности).

Целью данной статьи является определение сроков достижения равенства между потенциальными радиологическими рисками радиоактивных отходов (РАО) и природного урана (Упр) ЯЭ.

1. Материалы и методы

Проведено расчетное моделирование сценария развития в XXI веке ядерной энергетики России на основе АЭС с реакторами на тепловых и быстрых нейтронах. ТР развиваются и работают на базе топлива из обогащенного урана до тех пор, пока не исчерпан принятый в модели ресурс природного урана 540 тыс. т. Все облученное топливо из ТР перерабатывается, из него извлекается плутоний, минорные актиниды и некоторые долгоживущие продукты деления. На базе извлеченного плутония

развивается система БР. В модели принято, что в год запускается по 1 БР при наличии требуемого количества плутония. В модели учитываются ТР типа ВВЭР и РБМК и БР типа БРЕСТ-1200. К 2030 г. мощность системы достигает 47,3 ГВт, к 2100 г. – 107 ГВт и состоит к этому времени только из БР (рис. 1). БР работают в замкнутом топливном цикле. При переработке облученного топлива ТР и БР в долгоживущие РАО попадает не более 0,1 % урана, плутония, минорных актинидов, Sr, Cs, Tc и I от их содержания в переработанном топливе. Предполагается, что ежегодные партии РАО хранятся, учитывается изменение их нуклидного состава за счет радиоактивного распада. Получено, что на 2100 г. в системе ядерной энергетики будет накоплено 7523 т долгоживущих нуклидов.

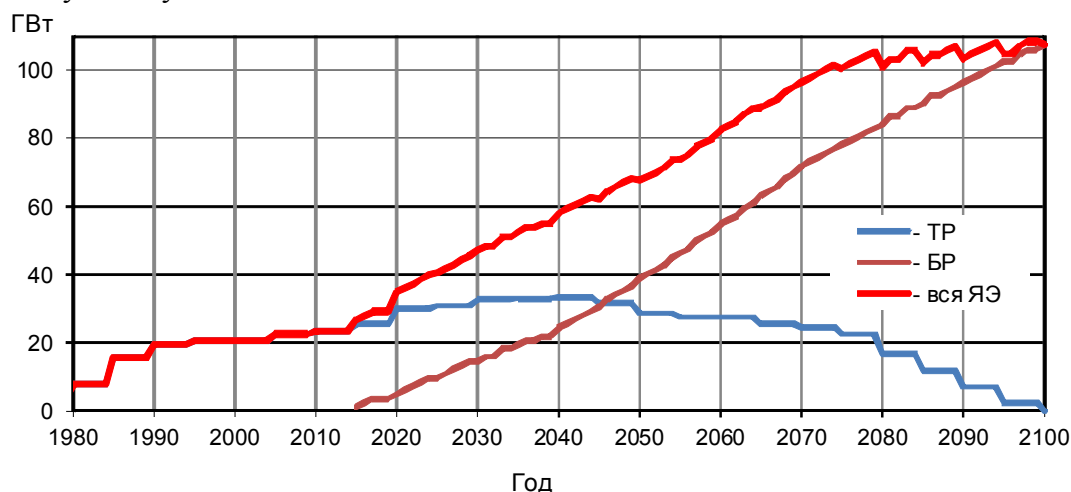


Рис. 1. Мощности тепловых и быстрых реакторов в рассмотренных сценариях развития системы ядерной энергетики в России

Для решения задач данной статьи применяются два подхода: определение времени сравнения ожидаемых эффективных доз (радиационная эквивалентность) и определение времени сравнения радиационных рисков (радиологическая эквивалентность).

Под ожидаемой эффективной дозой (ОЭД) понимается ожидаемая за жизнь эффективная доза от поступления радионуклидов в организм.

Эффективная доза представляет собой сумму эквивалентных доз в органах и тканях, взвешенных с учетом тканевых коэффициентов. Она используется в целях оценки радиационной защиты и не рекомендуется как мера радиологического риска в конкретных когортах и популяциях с конкретными фоновыми (в отсутствии облучения) показателями онкозаболеваемости. Избыточные радиационно индуцированные случаи рака в конкретной популяции могут быть описаны с помощью величины пожизненного атрибутивного риска (LAR) [5].

Исходными данными для определения радиационной и радиологической эквивалентности являются ожидаемые эффективные дозы $E(50)$ от основных изотопов РАО и изотопов природного урана в различные периоды времени. Эти данные получены при моделировании сценария развития ЯЭ на тепловых и быстрых реакторах до 2100 г. [2] с использованием базы данных коэффициентов МКРЗ [6].

Активность природного урана полагается практически неизменной в течение тысяч лет, и относительный вклад различных его радионуклидов в общую ОЭД представлен ниже.

Ожидаемая эффективная доза (ОЭД), E(50), для основных радионуклидов природного урана, нормированная на 1 мЗв его общей ОЭД

Rn-222	0,369
Po-210	0,296
Pb-210	0,170
Ra-226	0,069
Th-230	0,051
Ac-227	0,012
U-234	0,012
U-238	0,011
Другие	0,011
Всего	1,000

Активность ОЯТ и РАО, в отличие от природного урана, значительно изменяется со временем из-за более интенсивного радиоактивного распада составляющих их радионуклидов.

В таблицах 1 и 2 представлены ОЭД для РАО тепловых и быстрых реакторов (табл. 1), а также ОЭД основных радионуклидов ОЯТ тепловых реакторов (табл. 2), для различных календарных лет после их накопления в 2100 г. Эти дозы также нормированы на 1 мЗв использованного природного урана. Основными радионуклидами считаются те, чей относительный вклад в полную ОЭД ОЯТ или РАО не превышает 1 % за период прогноза.

Таблица 1

Ожидаемая эффективная доза (ОЭД), E(50), для основных радионуклидов РАО, которые будут накоплены к 2100 г. в России, нормированная на 1 мЗв общей ОЭД потребленного природного урана при использовании тепловых и быстрых реакторов

Календарный год	2100	2200	2300	2400	2500	2700	2900	3100
Радионуклид	E(50), мЗв							
Am-241	0,6679	0,6714	0,5745	0,4883	0,4165	0,3020	0,2194	0,1591
Am-242m	0,0797	0,0488	0,0299	0,0183	0,0112	0,0042	0,0016	0,0006
Ce-144	20,1794	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Cs-137	0,2201	0,0223	0,0022	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Eu-154	0,7720	0,0003	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Kr-85	4,3806	0,0075	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Pm-147	1,6122	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Pu-238	1,4650	0,7038	0,3397	0,1670	0,0837	0,0223	0,0065	0,0020
Pu-239	0,0959	0,0959	0,0955	0,0952	0,0952	0,0944	0,0941	0,0934
Pu-240	0,1774	0,1767	0,1745	0,1727	0,1709	0,1673	0,1641	0,1605
Ru-106	35,6191	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Sm-151	0,0478	0,0222	0,0671	0,0048	0,0022	0,0005	0,0001	0,0000
Sr-90	0,2086	0,0192	0,0017	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Другие	1,4256	0,0378	0,0085	0,0073	0,0069	0,0067	0,0066	0,0065
Всего	66,9511	1,8059	1,2938	0,9539	0,7866	0,5973	0,4923	0,4221

Таблица 2

Ожидаемая эффективная доза (ОЭД), E(50), для основных радионуклидов ОЯТ, которые будут накоплены к 2100 г. в России, нормированная на 1 мЗв общей ОЭД потребленного природного урана при использовании только тепловых реакторов

Календарный год	2100	2200	2600	3100	7100	12100	27100
Радионуклид	E(50), мЗв						
Am-241	72,5308	70,7355	31,7053	31,7053	0,0332	0,0039	0,0011
Am-243	0,4201	0,4165	0,3986	0,3986	0,2628	0,1641	0,0402
Cm-244	6,5709	0,1479	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Cs-134	4,2369	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Cs-137	84,7390	8,6534	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Np-237	0,0049	0,0062	0,0106	0,0106	0,0142	0,0141	0,0141
Pb-210	0,0000	0,0000	0,0001	0,0001	0,0042	0,0107	0,2912
Pu-238	53,8595	24,6677	0,4883	0,4883	0,0000	0,0000	0,0000
Pu-239	7,4685	7,4685	7,3608	7,3608	6,5350	5,7091	0,9012
Pu-240	12,6031	12,4954	11,8850	11,8850	7,4685	4,3806	0,0000
Pu-241	7,2531	0,0610	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001	0,0474
Sr-90	108,0781	9,9820	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000
Другие	3,7819	0,4439	0,0884	0,0884	0,0791	0,0816	0,0456
Всего	361,5469	135,0781	51,9373	51,9373	14,3971	10,3643	1,3410

Для РАО от тепловых и быстрых реакторов ОЭД Am-241 начинает превалировать через 100 лет хранения, хотя в РАО доля америция по массе составляет всего 0,23 %. Для ОЯТ тепловых реакторов Am-241 вносит основной вклад в общую ОЭД в период 2100–3100 гг., затем наибольший вклад вносят радиоизотопы Pu-240 и Pu-239.

Следует учитывать, что радиологические риски зависят от распределения эквивалентных доз в тканях и органах во времени [4]. Общие количественные показатели пожизненных радиологических рисков приведены НКДАР ООН [7]. Чтобы оценить радиологический риск для здоровья человека в конкретной популяции, в недавней Публикации 103 МКРЗ рекомендуется рассчитывать значение пожизненного атрибутивного риска (LAR) с использованием моделей риска, основанных на заболеваемости, для десяти различных локализаций солидных раков [5] и модели риска для лейкемии [8]. Согласно МКРЗ [5], значение LAR представляет собой консервативную аппроксимацию риска радиационно обусловленного рака (REIC), представленную НКДАР ООН [7], и описывает случаи избыточного рака в течение жизни, по сравнению с фоновыми показателями населения, определенными для неэкспонированных лиц.

После попадания определенного радионуклида или радионуклидного состава в организм в возрасте e_0 , динамика ежегодных эквивалентных доз $H_T(e-e_0)$ в конкретном органе или ткани T с течением времени $t = e - e_0$ может быть получена из базы данных МКРЗ дозовых коэффициентов [6]. Значение LAR, для локализации рака T , для лиц пола s после попадания в организм радионуклидов в возрасте e_0 , дается следующей формулой.

$$LAR_{s,T}(e_0) = \sum_{a=e_0+L_T}^{a=100} \sum_{e=e_0}^{e=a-L_T} EAR_{s,T}(a|e, H_T(e-e_0)) \cdot S(a|e_0), \quad (1)$$

где $EAR_{s,T}(a|e, H_T(e-e_0))$ – это увеличение частоты заболеваемости раком конкретной локализации T среди лиц пола s в достигнутом возрасте a , связанное с облучением определенного органа или ткани T в эквивалентной дозе $H_T(e-e_0)$ в возрасте e , где $EAR_{s,T}$ рассчитывается в соответствии с существующими моделями риска МКРЗ [5]; L_T – латентный период для радиационно индуцированного рака, который составляет 10 лет

для солидных раков и 2 года для лейкемии; $S(a|e_0)$ – это вероятность того, что человек будет жить от возраста e_0 до возраста a без развития рака.

Усредненное общее значение LAR рассчитывается в предположении аддитивности значений LAR для конкретных локализаций рака:

$$LAR = \sum_{s, e_0} \left(w(s, e_0) \cdot \sum_T LAR_{s,T}(e_0) \right), \quad (2)$$

где удельные веса $w(s, e_0)$ представляют половозрастную структуру данной популяции.

В работе используются официальные медико-демографические статистические данные о населении России для расчета значений LAR [9, 10].

2. Результаты и обсуждение

На рисунке 2 показано, что при развитии двухкомпонентной ядерной энергетической системы в России, основанной на тепловых и быстрых реакторах, равенство доз достигается примерно через 300 лет: соотношение ОЭД РАО и природного урана становится меньше единицы через 300 лет после накопление радиоактивных отходов к 2100 г. Равенство рисков, когда LAR используется в качестве количественной меры риска, достигается в три раза быстрее, менее чем за 100 лет.

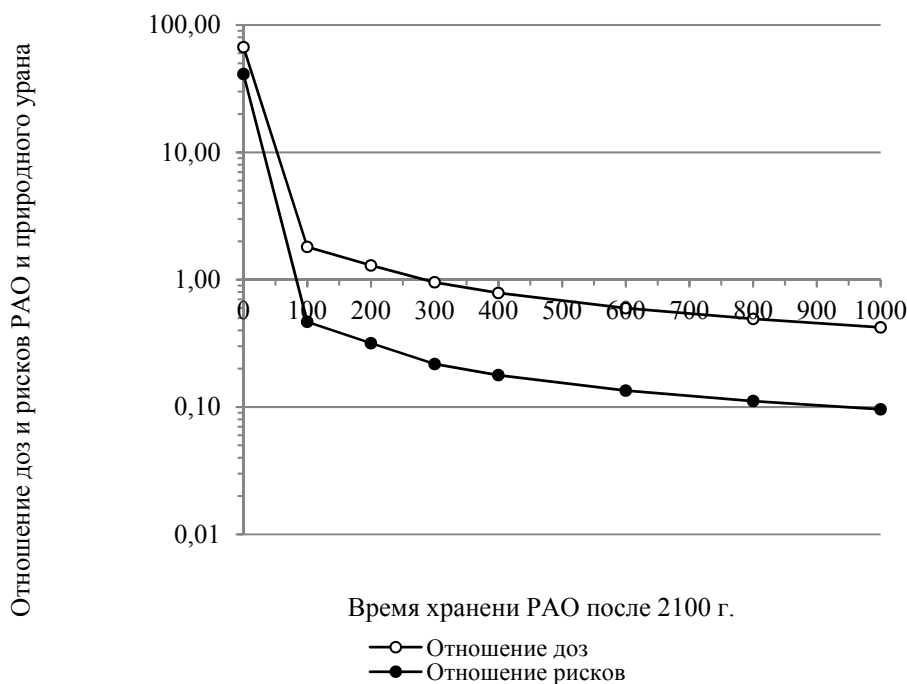


Рис. 2. Отношения доз и рисков радиоактивных отходов (РАО) тепловых и быстрых реакторов к дозам и рискам соответствующего количества потребленного природного урана.

Набор данных «Отношение доз» обозначает отношение ОЭД; набор данных «Отношение рисков» обозначает отношение пожизненных рисков (LAR)

На рисунке 3 показано, сколько времени потребуется для того, чтобы дозы и риски ОЯТ от тепловых реакторов стали равными или меньшими, чем дозы и риски, связанные с потребляемым природным ураном (когда отношение этих значений становится равным единице или меньше). Соотношение ОЭД остается больше единицы в течение более 25 тысяч лет после накопления ОЯТ к 2100 г. Это означает, что равенство доз ОЯТ и природного урана практически недостижимо, если развитие ядерной энергетической системы будет основано только на тепловых реакторах. Отношение величин LAR от ОЯТ и от природного урана достигает единицы через приблизительно 17 тыс. лет после

накопления ОЯТ к 2100 г. Таким образом, равенство радиационных рисков также практически недостижимо, если развитие ядерной энергетики будет основано только на тепловых реакторах.

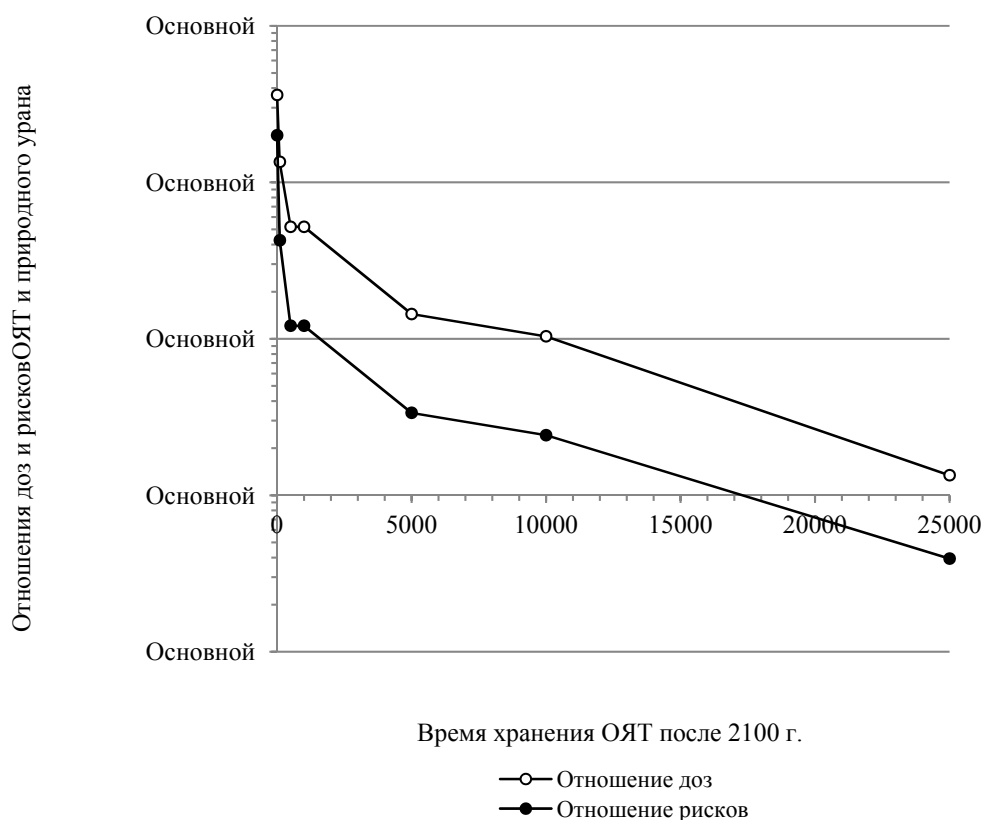


Рис. 3. Отношение доз и рисков облученного ядерного топлива (ОЯТ) из тепловых реакторов к дозам и рискам соответствующего количества потребленного природного урана.

Набор данных «Отношение доз» обозначает отношение ОЭД; набор данных «Отношение рисков» обозначает отношение пожизненных рисков (LAR)

Как видно из таблицы 1 для тепловых и быстрых реакторов, ОЭД Am-241 превалирует над ОЭД других радионуклидов РАО после первой сотни лет хранения отходов. Рисунок 4 показывает, что относительный вклад Am-241 в LAR от потенциального поступления РАО в организм человека также имеет максимальное значение в течение этого периода. Это означает, что доля Am-241 в РАО играет ключевую роль в достижении радиологической эквивалентности этих отходов и природного урана.

Как и в таблице 2 для ОЭД, на рисунке 5 показано, что для ОЯТ тепловых реакторов Am-241 вносит наибольший вклад в значение LAR в период хранения 2100–3100, затем на первое место выходят изотопы Pu-240 и Pu-239.

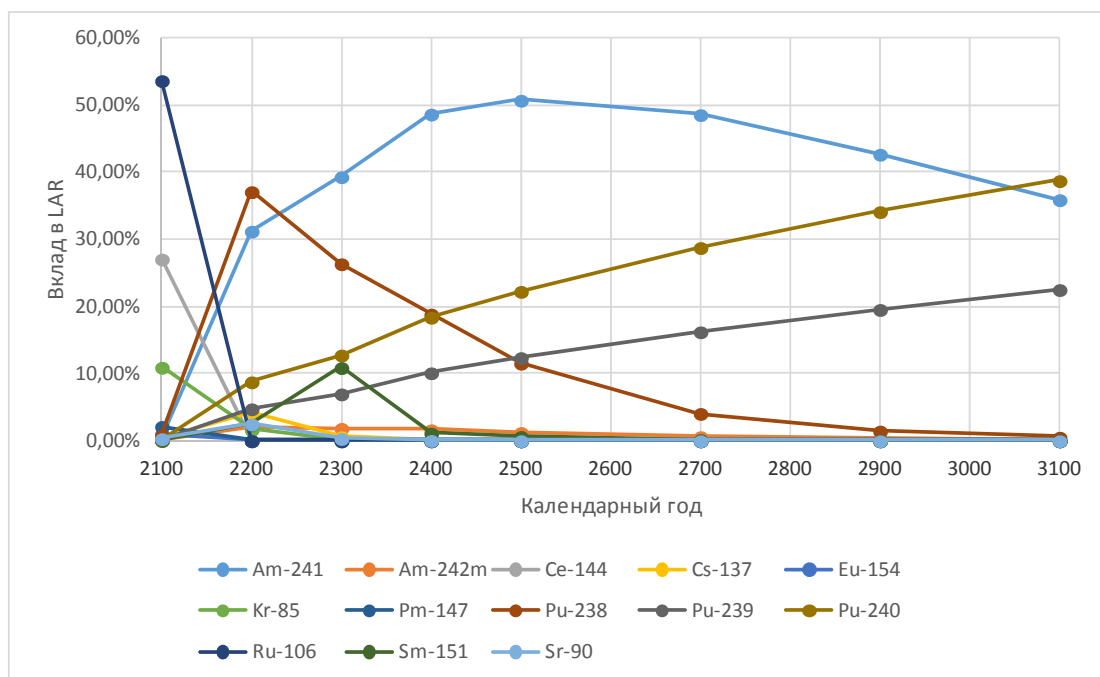


Рис. 4. Относительный вклад основных радионуклидов в пожизненный атрибутивный риск (LAR) радиоактивных отходов (РАО) от тепловых и быстрых реакторов

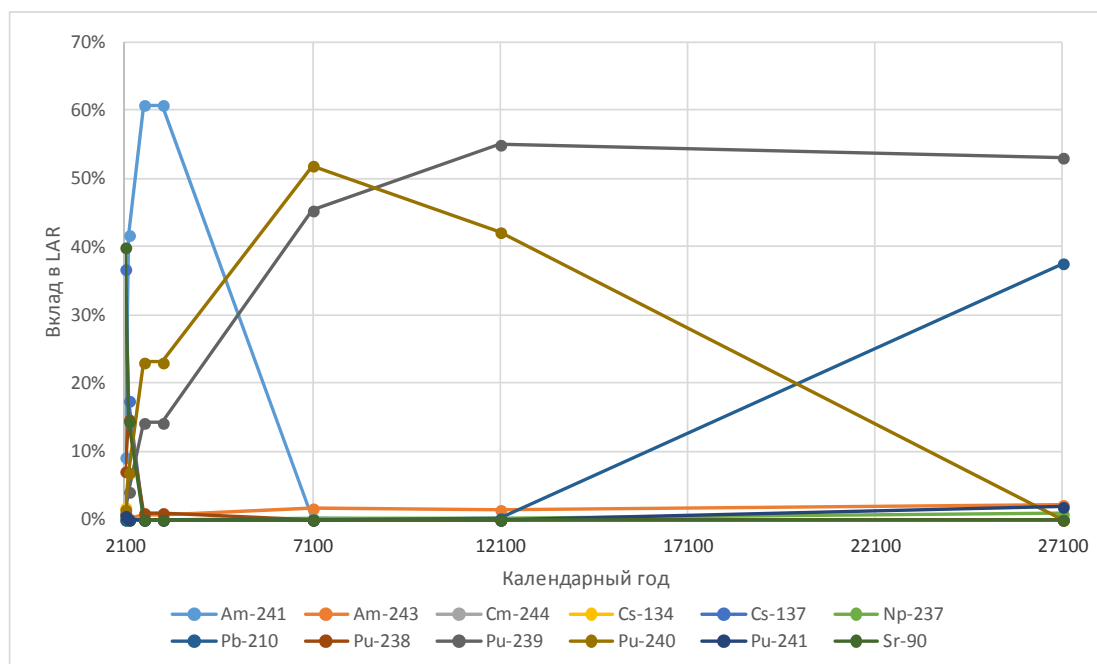


Рис. 5. Относительный вклад основных радионуклидов в пожизненный атрибутивный риск (LAR) облученного ядерного топлива (ОЯТ) тепловых реакторов

Заключение

Если до 2100 г. в России будут работать только тепловые реакторы, то в течение как минимум 17 000 лет после накопления ОЯТ радиологический риск для здоровья, связанный с ОЯТ, будет оставаться большим, чем риск от соответствующего количества потребленного природного урана.

В соответствии с рассмотренным сценарием развития крупномасштабной ядерной энергетики в России, на тепловых и быстрых реакторах до 2100 г. будет израсходовано 541,7 тыс. т природного урана и накоплено 7,523 тыс. т долгоживущих РАО.

Для рассмотренной двухкомпонентной ядерной энергетической системы, через 300 или даже 100 лет после накопления РАО, их эффективные дозы и радиологические риски (LAR) становятся равными или меньшими, чем у потребленного природного урана. Равенство ОЭД между РАО и природным ураном будет достигнуто через 300 лет после накопления РАО, тогда как равенство значений LAR будет достигнуто в три раза быстрее, т. е. менее чем за 100 лет.

Для сценария развития ядерной энергетической системы на основе реакторов на быстрых и тепловых нейтронах извлечение америция из РАО значительно сокращает время, необходимое для достижения равенства доз и рисков.

Реализация принципа равенства рисков для РАО и природного урана может быть использована для обоснования значительного сокращения времени хранения РАО.

Окончательное решение проблемы РАО требует оценки их радиологических рисков на основе использования современных международных моделей «доза-эффект», с учетом возможной вариации радионуклидного состава РАО.

Список литературы

1. Introduction to the use of the INPRO methodology in a nuclear energy system assessment. IAEA Nuclear Energy Series N NP-T-1.12. Vienna, IAEA, 2011. 59 p.
2. Адамов Е.О., Джалавян А.В., Лопаткин А.В., Молоканов Н.А., Муравьев Е.В., Орлов В.В., Калякин С.Г., Рачков В.И., Троянов В.М., Авронин Е.Н., Иванов В.Б., Алексахин Р.М. Концептуальные положения стратегии развития ядерной энергетики России в перспективе до 2100 г. // Атомная энергия. 2012. Т. 112. Вып. 6. С. 319–330.
3. Adamov E.O., Rachkov V.I. New technological platform for the national nuclear energy strategy development // Thermal Engineering. 2017. V. 64. N 13. P. 945–951.
4. Иванов В.К., Чекин С.Ю., Меньяло А.Н., Максюттов М.А., Туманов К.А., Кащеева П.В., Ловачев С.С., Адамов Е.О., Лопаткин А.В. Уровни радиологической защиты населения при реализации принципа радиационной эквивалентности: риск-ориентированный подход // Радиация и риск. 2018. Т. 27. № 3. С. 9–23.
5. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 // Ann. ICRP. 2007. V. 37. N 2–4. 332 p.
6. ICRP Database of Dose Coefficients: Workers and Members of the Public; Ver. 3.0, official website. Available at: <http://www.icrp.org/page.asp?id=145> (Accessed 12.07.2019).
7. UNSCEAR 2006 Report to the General Assembly, with scientific annexes. Volume I. New York, United Nations, 2018. 383 p.
8. Preston D.L., Kusumi S., Tomonaga M., Ron E., Kuramoto A., Kamada N., Dohy H., Matsui T., Nonaka H., Thompson D.E., Soda M. and Mabuchi K. Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part III. Leukaemia, lymphoma and multiple myeloma, 1950–1987 // Radiat. Res. 1994. V. 137. P. S68–S97.
9. Злокачественные новообразования в России в 2017 году (заболеваемость и смертность) /Под ред. А.Д. Каприна, В.В. Старинского, Г.В. Петровой. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2018. 250 с.
10. Демографический ежегодник России. 2017: Стат. сборник. М.: Росстат, 2017. 263 с.