

(при $\varphi = \pi$), температура графита может превышать 100 °С в то время, когда средняя температура блока ниже 70 °С. Однако эта область очень узкая и может сглаживаться за счет температурной зависимости коэффициента теплопроводности. Оценка температуры графита согласуется с экспериментально определенной температурой облучения. Это свидетельствует о том, что исследованный блок вытеснителя при работе в реакторе был смещен относительно оси трубы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гончаров В.В., Бурдаков Н.С., Виргильев Ю.С. и др. Действие облучения на графит ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1978.
2. Достов А.И. Энергия Вигнера в вытеснителях СУЗ РБМК. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2001, вып. 3, с. 22—31.
3. Bridge H., Kelly B., Gray B. Stored energy and dimensional changes in reactor graphite. — In: Proc. of the Fifth Conf. on Carbon, Pennsylvania, 1962, v. 1, p. 289—316.
4. Cotrell A., Bell J., Greenought G. Theory of annealing kinetics applied to the release of stored energy from irradiated graphite in air-cooled reactors. — In: Proc. Second United Nations Intern. Conf. on the Atomic Energy, 1958, v. 7, p. 315—327.
5. Хандамиров Ю.Э. Методика оценки флюенса повреждающих нейтронов на конструктивные элементы топливной ячейки и ячейки СУЗ реактора РБМК-1000. НИКИЭТ, отчет 16.964, 2000.
6. Platonov P.A., Trofimchuk E.I., Chugunov O.K., Karpukhin V.I. Annealing of radiation damage in graphite. — Radiation Eff., 1975, v. 25, p. 105—110.
7. Нормы расчета на прочность типовых узлов и деталей из графита уран-графитовых канальных реакторов НГР-01-90.
8. Тепло- и массообмен. Теплотехнический справочник. Под ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. М.: Энергоатомиздат, 1982.
9. Schweizer D., Gurinsky D., Kaplan E., Sastre C. A Safety Assessment of the Use of Graphite in Nuclear Reactors Licensed by the USA NRC. NUREG/CR-4981, BNL-NUREG-52092.
10. Токаренко В.Ф. Разностные схемы для уравнений динамики ВВР с кипением теплоносителя. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Динамика ядерных энергетических установок, 1975, вып. 1(7), с. 75—83.
11. Антипин Г.К., Потаманова Н.П. Подпрограмма для вычисления одномерного нестационарного температурного поля в многослойных пластинах, цилиндрах, шарах. — Там же, сер. Физика и техника ядерных реакторов, 1982, вып. 3(25), с. 72—76.

Поступила в Редакцию 25.12.02

УДК 621.039.7

РАДИОТОКСИЧНОСТЬ ПРИ ЗАВЕРШАЮЩЕЙ ТРАНСМУТАЦИИ АКТИНОИДОВ, НАКОПЛЕННЫХ В ТРАНСМУТАЦИОННЫХ РЕАКТОРАХ

*Бергельсон Б.Р., Герасимов А.С., Зарицкая Т.С., Киселев Г.В.,
Мырцымова Л.А., Тихомиров Г.В. (ФГУП ГНЦ РФ — ИТЭФ)*

При обращении с радиоактивными отходами важную роль играет ядерная трансмутация. Она позволяет снизить количество опасных нуклидов и облегчить их окончательное захоронение. Основная опасность радиоактивных отходов заключена в долгоживущих актиноидах отработавшего ядерного топлива энергетических реакторов.

В настоящей работе обсуждаются расчетные характеристики трансмутации актиноидов, накопившихся в самих трансмутационных реакторах за предыдущие периоды. Дожигание собственных актиноидов является заключительной стадией работы трансмутационных реакторов.

Сейчас затруднительно представить, какую роль будет играть трансмутация в перспективной ядерной энергетике, будет ли она проводиться в действующей ядерной энергетике или включится на стадии прекращения эксплуатации энергетических реакторов. Также не известно, какого типа реакторные установки будут применяться для трансмутации, будут ли это быстрые реакторы, имеющие оптимальный нейтронный баланс, но приводящие к образованию большого количества новых актиноидов, или высокопоточные электроядерные установки на жидком топливе, или установки других типов.

В статье анализировался частный случай заключительной стадии трансмутации в тяжеловодном реакторе с плотностью потока нейтронов $10^{14} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ [1]. Считалось, что трансмутации подвергались изотопы нептуния, америция и кюрия. Количество и изотопный состав актиноидов, накопленных в самом трансмутационном реакторе до начала заключительной стадии трансмутации, соответствовали равномерной подпитке актиноидами, извлекаемыми из отработавшего ядерного топлива одного ВВЭР-1000 (для подпитки от произвольного числа энергетических реакторов количество актиноидов в начале заключительной стадии пропорционально увеличивается). Для заключительного режима трансмутации, в котором момент прекращения подпитки принимался за начало отсчета времени, вычисляли количество каждого нуклида и радиотоксичность как функцию времени трансмутации.

Основной целью исследования была оценка временных характеристик заключительной трансмутации в тепловом реакторе при умеренной плотности потока. Поэтому в принятой постановке задачи имелись упрощающие обстоятельства. Так, считалось, что трансмутируются только изотопы нептуния, америция и кюрия, не рассматривалась трансмутация накопленного и служащего топливом быстрых реакторов плутония. Кроме того, актиноиды, образующиеся в топливе самого трансмутационного реактора, не включались в трансмутацию (в рассмотренном реакторе их образуется немного, и их включение лишь незначительно ухудшило бы характеристики трансмутации).

При расчете стационарного режима трансмутации скорость подпитки принималась равной средней скорости выгрузки актиноидов из одного ВВЭР-1000, изотопный состав подпитки [2] соответствовал выгоранию 40 ГВт·сут/т, масса ^{237}Np , ^{241}Am , ^{243}Am и ^{244}Cm в выгружаемом топливе в расчете на один год работы составляла 17,5, 17, 3,38 и 0,89 кг соответственно. В таблице приведена рассчитанная масса нуклидов в заключительном режиме трансмутации в зависимости от времени. Масса для момента времени $T = 0$ равна массе в стационарном режиме трансмутации.

Интересно проанализировать изотопный состав актиноидов, устанавливающийся в стационарном режиме трансмутации. Данные таблицы, соответствующие $T = 0$, показывают, что важнейшими нуклидами в стационарном режиме являются ^{237}Np , ^{238}Pu , ^{242}Pu , ^{241}Am , ^{243}Am , ^{242}Cm , ^{244}Cm , ^{246}Cm , ^{248}Cm . Из них ^{237}Np , ^{241}Am , ^{243}Am и ^{244}Cm содержатся в подпитке. ^{238}Pu образуется из ^{237}Np и ^{241}Am через короткоживущий ^{242}Cm . ^{242}Pu , ^{246}Cm и ^{248}Cm накапливаются с большой стационарной

Масса нуклидов в режиме трансмутации без подпитки, г

Нуклид	T, год						
	0	50	100	150	200	250	300
²³⁷ Np	25 000	$1,65 \cdot 10^{-10}$	0	0	0	0	0
²³⁸ Pu	15 100	0,0117	$5,42 \cdot 10^{-6}$	$2,50 \cdot 10^{-9}$	0	0	0
²³⁹ Pu	7970	0,0065	$2,99 \cdot 10^{-6}$	$1,39 \cdot 10^{-9}$	0	0	10
²⁴⁰ Pu	3890	0,899	$4,15 \cdot 10^{-4}$	$1,93 \cdot 10^{-7}$	0	0	0
²⁴¹ Pu	1980	0,474	$2,19 \cdot 10^{-4}$	$1,01 \cdot 10^{-7}$	0	0	0
²⁴² Pu	19 100	6,05	0,0028	$1,30 \cdot 10^{-6}$	0	0	0
²⁴¹ Am	7340	0,0118	$5,48 \cdot 10^{-6}$	$2,53 \cdot 10^{-9}$	0	0	0
²⁴³ Am	14 800	3,84	0,0018	$8,23 \cdot 10^{-7}$	0	0	0
²⁴² Cm	7080	0,0126	$5,84 \cdot 10^{-6}$	$2,70 \cdot 10^{-9}$	0	0	0
²⁴³ Cm	183	$3,44 \cdot 10^{-4}$	$1,60 \cdot 10^{-7}$	0	0	0	0
²⁴⁴ Cm	46 300	50,5	0,0233	$1,08 \cdot 10^{-5}$	$5,01 \cdot 10^{-9}$	0	0
²⁴⁵ Cm	89 700	1,0	0,0015	$3,49 \cdot 10^{-4}$	$1,09 \cdot 10^{-4}$	$3,31 \cdot 10^{-5}$	$1,01 \cdot 10^{-5}$
²⁴⁶ Cm	44 200	17 400	5260	1590	480	145	43,8
²⁴⁷ Cm	16 303	668	202	60,9	18,4	5,54	1,68
²⁴⁸ Cm	9930	6620	2480	806	250	76,4	23,2
²⁴⁹ Bk	167	112	42,0	13,7	4,24	1,30	0,393
²⁴⁹ Cf	17,6	11,8	4,47	1,45	0,452	0,137	0,0416
²⁵⁰ Cf	53,9	36,3	13,7	4,45	1,38	0,421	0,128
²⁵¹ Cf	6,4	4,3	1,62	0,526	0,163	0,05	0,0151
²⁵² Cf	361	252	96,1	31,4	9,74	2,98	0,905

массой вследствие относительно низких нейтронных сечений. Высокое стационарное количество ²⁴²Cm объясняется большим нейтронным сечением ²⁴¹Am. Хотя период полураспада ²⁴²Cm составляет 163 сут, скорость его образования из ²⁴¹Am при плотности потока $10^{14} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ примерно равна скорости его распада. Поэтому стационарное количество ²⁴²Cm близко к стационарному количеству ²⁴¹Am. В тепловом нейтронном спектре при длительном облучении накапливаются изотопы берклия, калифорния и эйнштейния. Первые два из них имеют относительно небольшой период полураспада или высокое нейтронное сечение. Поэтому их стационарная масса существенно меньше массы основных нуклидов. Стационарная масса изотопов эйнштейния не представлена в таблице вследствие малости из-за малого периода полураспада.

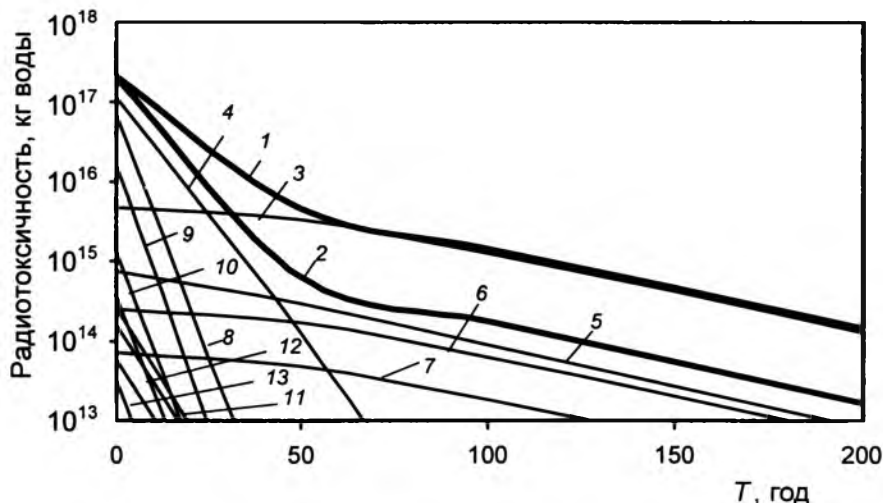
При трансмутации в заключительной стадии без подпитки прежде всего трансмутируются изотопы плутония, америция, легкие изотопы кюрия. В то же время образуются тяжелые изотопы кюрия и изотопы берклия, калифорния, эйнштейния. Для их трансмутации требуется значительное время или высокие потоки нейтронов. Далекие актиноиды уничтожаются путем деления ²⁴⁵Cm, ²⁴⁷Cm, ²⁴⁹Cf, ²⁵¹Cf, ²⁵²Cf, ²⁵³Cf, ²⁵⁴Es.

Данные таблицы показывают, что за 50 лет трансмутации масса изотопов нептуния, плутония, америция, ²⁴²Cm—²⁴⁴Cm уменьшается в 100—10 000 раз. В то же

время ^{246}Cm — ^{248}Cm , изотопы берклия и калифорния трансмутируются значительно медленнее. Поскольку разные изотопы имеют разную радиационную опасность, необходимо анализировать трансмутацию с точки зрения радиотоксичности. В статье использовалась радиотоксичность по воде, рассчитываемая по предельно допустимой активности нуклидов в воде [3].

На рисунке показана радиотоксичность основных нуклидов и полная радиотоксичность в заключительной стадии трансмутации. Радиотоксичность является более адекватной характеристикой радиационной опасности, чем масса или активность нуклидов, так как она учитывает характеристики излучения конкретных нуклидов. На рисунке приведена также кривая для суммарной радиотоксичности долгоживущих нуклидов без учета вклада ^{249}Bk ($T_{1/2} = 351$ сут) и ^{252}Cf ($T_{1/2} = 2,64$ года). Данные рисунка показывают, что в первые 10 лет трансмутации радиотоксичность вызывается главным образом ^{244}Cm . Этот нуклид трансмутируется за счет превращения в ^{245}Cm и распада. Другие нуклиды с высокой радиотоксичностью ^{242}Cm , ^{238}Pu , изотопы америция и плутония быстро трансмутируются из-за высоких нейтронных сечений. После 30—40 лет трансмутации общая радиотоксичность определяется ^{252}Cf с периодом полураспада 2,64 года. Суммарная радиотоксичность долгоживущих нуклидов определяется ^{246}Cm и ^{250}Cf . Она в 5—7 раз меньше радиотоксичности ^{252}Cf . В течение 50 лет трансмутации общая радиотоксичность снижается в 50 раз, в течение 100 лет — в 150 раз. Радиотоксичность долгоживущих нуклидов уменьшается медленно. За период от 50 до 100 лет она снижается в 3,7 раза, за каждые следующие 50 лет — в 3,2 раза.

Исследования показали, что заключительная стадия трансмутации является важной частью заключительной стадии ядерной энергетики. На этой стадии происходит дожигание актиноидов, накопленных в самих трансмутационных реакторах без подпитки актиноидами из внешних хранилищ. При трансмутации в тепловых реакторах с умеренной плотностью потока образуются тяжелые изотопы кюрия и изотопы берклия и калифорния. Если плотность потока составляет $\sim 10^{14} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, то



Радиотоксичность в заключительной стадии трансмутации: 1 — полная радиотоксичность; 2 — суммарная радиотоксичность долгоживущих нуклидов; 3 — ^{252}Cf ; 4 — ^{244}Cm ; 5 — ^{246}Cm ; 6 — ^{250}Cf ; 7 — ^{249}Bk ; 8 — ^{242}Cm ; 9 — ^{238}Pu ; 10 — ^{241}Am ; 11 — ^{241}Pu ; 12 — ^{243}Am , ^{243}Cm ; 13 — ^{239}Pu , ^{240}Pu

общая радиотоксичность за первые 50 лет трансмутации снижается в 50 раз (главным образом за счет трансмутации ^{244}Cm). В следующие периоды она определяется, в основном, ^{252}Cf , ^{246}Cm и ^{250}Cf . Суммарная радиотоксичность долгоживущих нуклидов снижается медленно, она уменьшается в 3,2 раза через каждые 50 лет трансмутации.

Использование высокопоточных трансмутационных реакторов на стадии стационарной трансмутации обеспечивает более низкую стационарную массу актиноидов. Это облегчает трансмутацию на заключительной стадии. Если высокопоточные трансмутационные реакторы применяются на заключительной стадии трансмутации, то сокращается время трансмутации. Применение высокопоточных трансмутационных реакторов на стационарной и заключительной стадиях обеспечивает наиболее эффективную трансмутацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герасимов А.С., Зарицкая Т.С., Киселев Г.В., Мырцымова Л.А. Циклический режим трансмутации младших актиноидов в тяжеловодном реакторе. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2001, вып. 3, с. 3—10.
2. Колобашкин В.М., Рубцов П.М., Ружанский П.А., Сидоренко В.Д. Радиационные характеристики облученного ядерного топлива. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99). М., Минздрав России, 1999.

Поступила в Редакцию 16.10.02

УДК 621.039.7

ОЦЕНКА УЩЕРБА ОТ СБРОСОВ РАДИОНУКЛИДОВ В ОТКРЫТЫЙ ВОДОЕМ

*Лобачева Н.А., Соболев И.А., Турлак Е.А. (ГУП МосНПО «Радон»),
Полуэктов П.П. (ФГУП ВНИИНМ им. А.А. Бочвара)*

Совершенствование экономического механизма охраны окружающей природной среды определено в качестве одной из первостепенных задач устойчивого развития страны [1, 2]. Основным принципом устойчивого развития является соблюдение баланса между темпами экономического развития и охраной окружающей среды и, как следствие, внедрение экологически надежных, сберегающих ресурсы и минимально загрязняющих окружающую среду технологических процессов. Решением этой проблемы является создание универсального механизма определения оценки ущерба природным ресурсам и сравнительного анализа соотношения между наносимым и предотвращенным в результате хозяйственной деятельности предприятия ущербом.

В настоящей статье приведены методология оценки ущерба от сбросов радиоактивных веществ в открытый водоем в результате производственной деятельности МосНПО «Радон» в 1999 г. и результаты анализа соотношения фактического и потенциального ущерба в случае сброса сточных вод с разрешенной и максимально разрешенной активностью, а также сравнительного анализа наносимого и предотвращенного ущерба.