

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Немировская С. А., Рудик А. П. «Атомная энергия», 1974, т. 37, вып. 4, с. 428.  
 2. Немировская С. А., Рудик А. П. Препринт ИТЭФ № 3. М., 1976.

3. Зарицкая Т. С., Рудик А. П. «Атомная энергия», 1969, т. 26, вып. 5, с. 432.  
 4. Немировская С. А., Рудик А. П. Препринт ИТЭФ № 2. М., 1975.  
 5. «Jaderná Energie», 1975, v. 21, N 4.  
 6. Кашутин А. А., Хромов В. В. В кн.: Физика ядерных реакторов. Вып. 4. М., Атомиздат, 1975, с. 61.

УДК 621.039.5.58

Снижение осколочной активности и мощности остаточного тепловыделения в жидкосолевых реакторах с циркулирующим топливом

БЛИНКИН В. Л., ГЕЛЬМАН Э. Б., НОВИКОВ В. М.

В последние годы широко обсуждается вопрос о целесообразности использования в качестве реакторообразователей жидкосолевых ядерных реакторов с циркулирующим топливом [1, 2], в которых реализуется уран-ториевый топливный цикл, а ядерное топливо ( $^{233}\text{UF}_4$ ) и сырье для воспроизводства ( $\text{ThF}_4$ ) находятся в составе расплавленных фторидов лития и бериллия. Расплавленная топливная соль циркулирует через активную зону, выполняя одновременно функцию теплоносителя. Расширенное воспроизводство топлива в тепловом уран-ториевом реакторе возможно только при непрерывной очистке циркулирующего топлива от продуктов деления. Предлагаемые и частично разработанные методы в принципе позволяют выводить практически все продукты деления из топливной соли [3]. Организация такой системы позволит не только избавиться от отравления реактора в процессе его работы, но и уменьшить активность топливной соли и тем самым увеличить безопасность реактора и его ремонтоспособность.

В настоящей работе приведены расчеты осколочной активности и остаточного тепловыделения в циркулирующей топливной соли при различных скоростях выведения отдельных групп химических элементов, возникающих при делении  $^{233}\text{U}$ . Оценены скорости и режимы выведения продуктов деления, позволяющие снизить осколочную активность до приемлемого уровня.

Расчет активности продуктов деления проводился для 84 разветвленных изобарных цепочек распада продуктов деления  $^{233}\text{U}$  [4]. Цепочки описывались 174 линейными цепочками распада с учетом выгорания элементов под действием тепловых нейтронов и выведения этих элементов из системы в экстракционных устройствах с периодом  $\tau$ .

Уравнения, описывающие кинетику процесса в точечном приближении (без учета выгорания урана), имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{dn_{i1}}{dt} &= \beta_{i1} \sigma_f n_U - (\lambda_{i1} + \sigma_c^{i1} \Phi + \tau_{i1}^{-1}) n_{i1}; \\ \frac{dn_{ij}}{dt} &= \beta_{ij} \sigma_f n_U + \lambda_{i, j-1} n_{i, j-1} - (\lambda_{ij} + \sigma_c^{ij} \Phi + \tau_{ij}^{-1}) n_{ij}; \end{aligned} \quad (1)$$

$i = 1, 2, \dots, N; j = 2, 3, \dots, M$ , где  $i$  — порядковый номер линейной цепочки;  $j$  — порядковый номер элемента в цепочке;  $N$  — число линейных цепочек;

$M$  — число нестабильных элементов в цепочке;  $\Phi$  — плотность потока тепловых нейтронов;  $n_U$  — концентрация  $^{233}\text{U}$ ;  $\sigma_f$  — микроскопическое сечение деления  $^{233}\text{U}$ ;  $t$  — переменная времени;  $n_{ij}$  — концентрация  $j$ -го элемента, входящего в  $i$ -ю цепочку;  $\beta_{ij}$  — независимый выход элемента при делении;  $\lambda_{ij}, \sigma_c^{ij}, \tau_{ij}$  — постоянная распада, микроскопическое сечение поглощения тепловых нейтронов и период выведения для  $ij$ -го элемента соответственно.

Активность топливной соли, отнесенная к единице мощности реактора, определяется соотношением

$$A(t) = \sum_{ij} \lambda_{ij} n_{ij}(t) / q \sigma_f n_U \Phi, \quad (2)$$

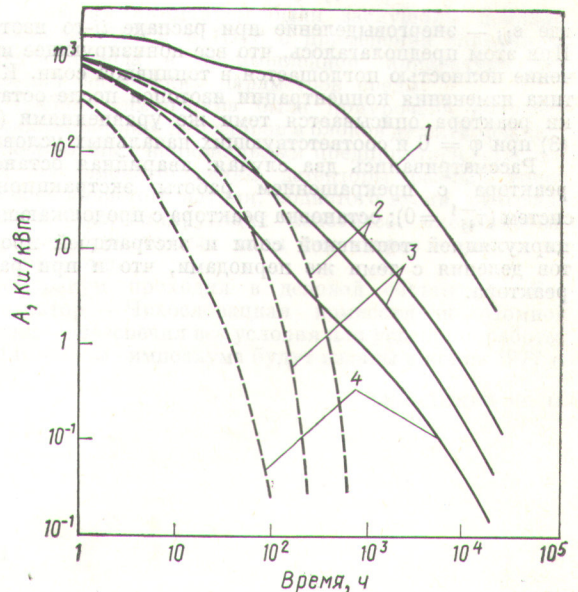


Рис. 1. Изменение активности топливной соли со временем (после остановки реактора):

1 — без выведения продуктов деления; 2 — период выведения негазообразных продуктов деления с  $\tau = 3$  сут; 3 —  $\tau = 1$  сут; 4 —  $\tau = 4$  ч; — — — прекращение выведения продуктов деления в момент остановки реактора (первый случай); - - - - продолжение выведения продуктов деления после остановки реактора (второй случай)



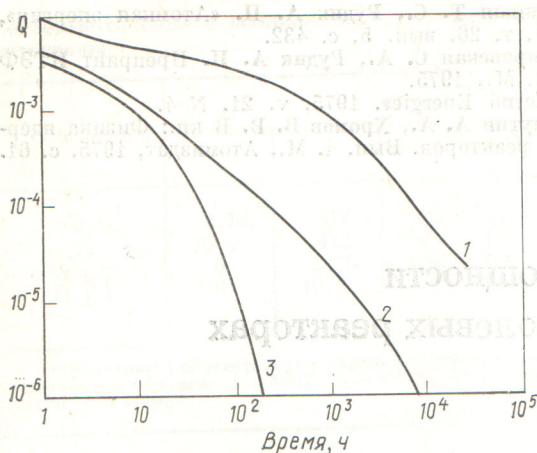


Рис. 2. Зависимость мощности остаточного тепловыделения в топливной соли (кВт/кВт мощности реактора) от времени (после остановки реактора):

1 — без выведения продуктов деления; 2 — выведение продуктов деления при работе реактора с  $\tau = 1$  сут и прекращение выведения в момент остановки реактора; 3 — выведение продуктов деления с  $\tau = 1$  сут как при работе реактора, так и после его остановки

где  $q$  — энерговыделение при делении урана.

Мощность остаточного тепловыделения в топливной соли, нормированная на единицу мощности реактора, вычислялась по формуле

$$Q(t) = \sum_{ij} \epsilon_{ij} \lambda_{ij} n_{ij}(t) / q \sigma_t n_U \Phi, \quad (3)$$

где  $\epsilon_{ij}$  — энерговыделение при распаде  $ij$ -го изотопа. При этом предполагалось, что все ионизирующее излучение полностью поглощается в топливной соли. Кинетика изменения концентрации изотопов после остановки реактора описывается теми же уравнениями (1) — (3) при  $\phi = 0$  и соответствующих начальных условиях.

Рассматривались два случая: аварийная остановка реактора с прекращением работы экстракционных систем ( $\tau_{ij}^{-1} = 0$ ); остановка реактора с продолжающейся циркуляцией топливной соли и экстракцией продуктов деления с теми же периодами, что и при работе реактора.

Расчеты активности топливной соли и мощности остаточного тепловыделения после остановки реактора проводились на ЭВМ БЭСМ-6 с помощью написанной для этой цели программы CHAINS, решающей систему уравнений (1) — (3). Предполагалось, что реактор перед остановкой работал в течение одного года на номинальной мощности при средней плотности потока тепловых нейтронов  $\phi = 10^{15}$  нейтр./ $(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ . Газообразные продукты деления, например ксенон и криптон, непрерывно выводились с периодом 30 мин, а остальные продукты деления — с периодом от 3 сут до 4 ч. Результаты расчетов приведены на рис. 1 и 2, откуда следует, что в первом случае активность топливной соли по сравнению с активностью системы, в которой экстракция продуктов деления не происходит, уменьшается через 1 мес после остановки реактора в 30 раз при  $\tau = 3$  сут и в 150 раз при  $\tau = 4$  ч. Во втором случае активность уменьшается в 150 и 25000 раз соответственно уже через 100 ч после остановки реактора. Мощность остаточного тепловыделения в момент остановки реактора с  $\tau = 1$  сут в 1,5 раза меньше, чем при отсутствии выведения продуктов. Через 5 сут после остановки реактора отношение мощностей достигает 1/5 и 1/440 в первом и втором случаях соответственно.

Снижение активности соли за счет выведения продуктов деления в 100—150 раз при мощности реактора 1000—2000 МВт позволяет использовать те же подвижные защитные экраны для производства ремонтных работ вблизи активного контура, какие были использованы при ремонте оборудования реактора MSRE, имевшего тепловую мощность 8 МВт и работавшего без выведения газообразных продуктов деления [5].

Уменьшение мощности остаточного тепловыделения в топливной соли значительно облегчит и упростит систему аварийного охлаждения реактора, что увеличивает безопасность системы и ее ремонтоспособность.

Поступило в Редакцию 27/1 1977 г.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блинкин В. Л. Препринт ИАЭ-2589. М., 1975.
2. Mc Neese L., Rosental M. «Nucl. News», 1974, v. 17, N 12, p. 52.
3. Crimes W. «Nucl. Appl. Technol.», 1970, v. 8, p. 137.
4. Гусев Н. Г. и др. Радиационные характеристики продуктов деления. Справочник. М., Атомиздат, 1974.
5. Haubenreich P., Engel J. «Nucl. Appl. Technol.», 1970, v. 8, p. 118.