

УДК 621.039.59.001.57

## Математическое моделирование процессов экстракционной переработки потоков ядерного топлива.

### 6. ВЛИЯНИЕ КОЛЕБАНИЙ ПОТОКОВ НА НАКОПЛЕНИЕ ПЛУТОНИЯ

РОЗЕН А. М., ЗЕЛЬВЕНСКИЙ М. Я.

В работе [1, 2] было показано, что на стадии экстракции в первом цикле схемы экстракционной регенерации топлива типа ВВЭР при уменьшении отношения потоков и приближении режима к предельному происходит внутреннее накопление плутония, которое может быть значительным и создавать угрозу для ядерной безопасности [3, 4]. Было найдено, что значительное накопление плутония возможно лишь в очень узком интервале режимов, близких к предельному [4, рис. 8], причем при длительной работе на «опасном» отношении потоков. Между тем на практике колебания потоков неизбежны, и можно было ожидать, что колебания, выводящие систему за пределы узкой опасной области, сильно снизят внутреннее накопление плутония. Этот вопрос исследован в настоящей работе путем сравнения накопления плутония в экстракторе при переходном процессе от номинального режима в отсутствие колебаний отношения потоков и при их наличии.

Известно, что важной технологической характеристикой экстракционного процесса является насыщение ураном органической фазы (экстракта), выходящей из экстрактора. С одной стороны, насыщение желательно повышать, так как улучшается очистка экстракта от продуктов деления и увеличивается производительность аппарата, с другой стороны, при этом возрастают внутреннее накопление плутония и потери ценных компонентов с рафинатом [5]. Вторая задача настоящей работы — установить область насыщений, допустимых с позиций ядерной безопасности, в зависимости от технологических параметров и характеристик колебаний потоков.

**Схема экстрактора и метод исследования.** В качестве объекта исследования был выбран экстрактор первого цикла экстракционной (на трибутилфосфате — ТБФ) схемы переработки раствора топлива типа ВВЭР [6]. Предполагалось, что экстрактор имеет 10 ступеней в экстракционной и 5 ступеней в промывной секциях (рис. 1). Время пребывания водной фазы в смесительной камере ступени  $\tau_x^{см} = 0,025$  ч, в отстойной камере —  $\tau_x^{от} = 0,05$  ч.

Для исследования были использованы математическая модель экстракционного процесса, проводимого в каскаде смесителей-отстойников, и алгоритм расчета на ЭВМ, подробно описанные в работе [4].

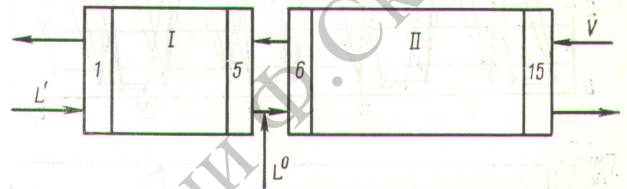


Рис. 1. Схема экстрактора, входные потоки и концентрации в номинальном режиме:

I — промывная секция (ступени 1—5,  $n_{пр} = V/L'$ ); II — экстракционная секция (ступени 6—15,  $n_0 = V/L^0 + L'$ );  $L'$  — промывной раствор ( $L' = 0,6$  л/ч;  $x_{HNO_3} = 3$  моль/л);  $L^0$  — исходный водный раствор ( $L^0 = 1$  л/ч;  $x_U^0 = 300$  г/л;  $x_{Pu}^0 = 3$  г/л;  $x_{HNO_3} = 3$  моль/л);  $V$  — экстракт ( $V = 3,3$  л/ч;  $y_U^0 = 0$ ;  $S_0 = 1,09$  моль/л  $\approx 30\%$ -ный ТБФ);  $x, y$  — концентрации в водной и органической фазах

### Влияние колебаний на накопление плутония.

Для учета колебаний модель [4] была дополнена уравнениями, описывающими два типа колебаний отношения потоков — синусоидальное и импульсное соответственно:

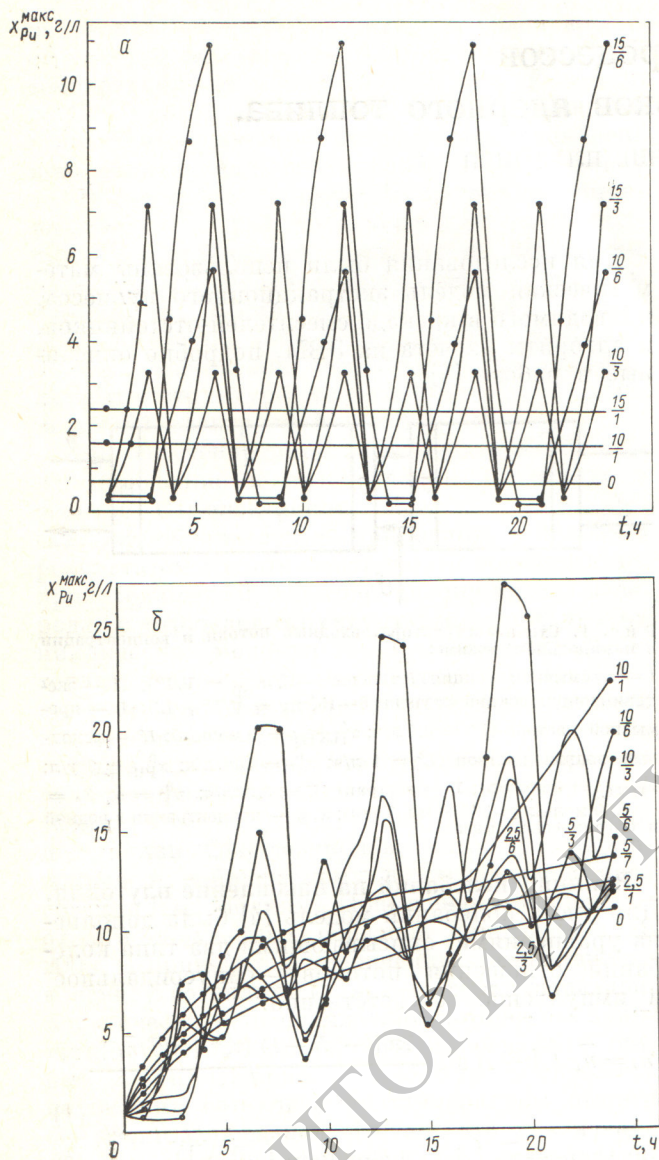
$$n_i = \bar{n}_i \left\{ 1 + A \sin \frac{2\pi [t - (N-1) (\tau_x^{см} + \tau_x^{от} / \bar{n}_i)]}{T} \right\}; \quad (1)$$

$$n_i = \bar{n}_i \left\{ 1 + A \operatorname{sign} \left[ \sin \left( \frac{2\pi t}{T} \right) \right] \right\}, \quad (2)$$

где  $\bar{n}_i$  — среднее отношение потоков в  $i$ -ступени;  $A$  — амплитуда колебаний, отн. ед.;  $T$  — период колебаний, ч;  $t$  — текущее время;  $N$  — число ступеней в каскаде.

В серии расчетов для синусоидальных колебаний \* отношения потоков учитывалось [см. уравнение (1)] постепенное продвижение фронта возмущения по экстрактору (полагалось, что

\* Как и в предыдущих работах [3—5], полагалось, что переходный процесс по концентрациям значительно более длителен, чем переходный процесс по расходам, поэтому последний при расчетах не учитывался.



Р и с. 2. Накопление плутония при колебаниях отношения потоков (цифры у кривых: числитель — амплитуда, %; знаменатель — период, ч):  
 а —  $\bar{n}^0 = 3,3$ ; б —  $\bar{n}^0 = 3,0$

возмущение вносится потоком органической фазы; амплитуда колебаний варьировалась от 1 до 15%, период колебаний — от 1 до 6 ч. Оказалось, что такие колебания отношения потоков практически не сказываются на накоплении плутония. Вторая серия расчета была проведена в предположении о прямоугольной (импульсной) форме колебаний [см. уравнение (2)]. Можно было ожидать, что такие коле-

бания являются более близкими к действительным и одновременно сравнительно сильно действующими на процесс накопления. Исследовались колебания около средних значений  $\bar{n}^0 = 3,3; 3,2; 3,1; 3,0; 2,9$  (предельный режим  $\bar{n}^0 = 2,98$ ) с амплитудой в пределах 2,5—15% и периодом 1—6 ч.

Расчеты показали, что, во-первых, при отношениях потоков, далеких от предельного ( $n^0 = 3,3 \div 3,1$ ), экстрактор сравнительно быстро выходит на стационарный режим (за 1—3 ч), при этом по мере увеличения амплитуды и периода колебаний накопление плутония возрастает (рис. 2, а); во-вторых, режимы, близкие к предельному ( $n^0 = 3,0$ ), отличаются тем, что стационарное состояние не успевает установиться за 24 ч даже в отсутствие колебаний, при  $T \geq 3$  ч возникают колебания концентраций, которые при  $A = 10\%$  становятся асимметричными и очень значительными (рис. 2, б)\*. Можно заключить, что как синусоидальные, так и импульсные колебания отношения потоков не только не снижают накопления плутония по сравнению с процессом в отсутствие колебаний, но, наоборот, приводят к его возрастанию. В области, далекой от предельного режима, это объясняется тем, что экстрактор сравнительно быстро выходит на стационарный режим, соответствующий «плюсовому» или «минусовому» отклонениям от среднего значения отношения потоков. Рост накопления дает, естественно, минусовая фаза колебаний, причем при росте  $A$  и  $T$  режим в течение более длительного времени приближается к предельному. Вблизи от предельного режима плюсовая фаза уже не в состоянии сбросить накопление, возникающее в минусовой фазе; среднее значение накопления становится вдвое выше, чем в отсутствие колебаний.

**Представление данных с помощью диаграмм накопление — насыщение.** В работах [1—4] накопление плутония представлялось как функция отношения потоков. Для анализа процесса более удобно представление данных с помощью диаграмм накопление (плутония) — насыщение (органической фазы ураном), особенно когда все параметры процесса, кроме расходов, достаточно стабильны. Такие диаграммы (рис. 3) имеют два участка: слабое влияние насыщения (а) и резкое возрастание накопления (б). Надежными (с позиций ядерной безопасности) явля-

\* При  $T = 1$  ч колебания концентраций не показаны, чтобы не загромождать чертеж.

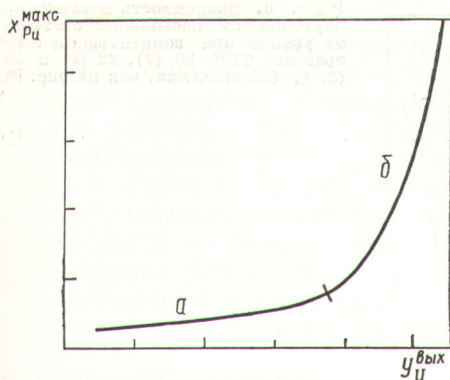


Рис. 3. Диаграмма накопление — насыщение

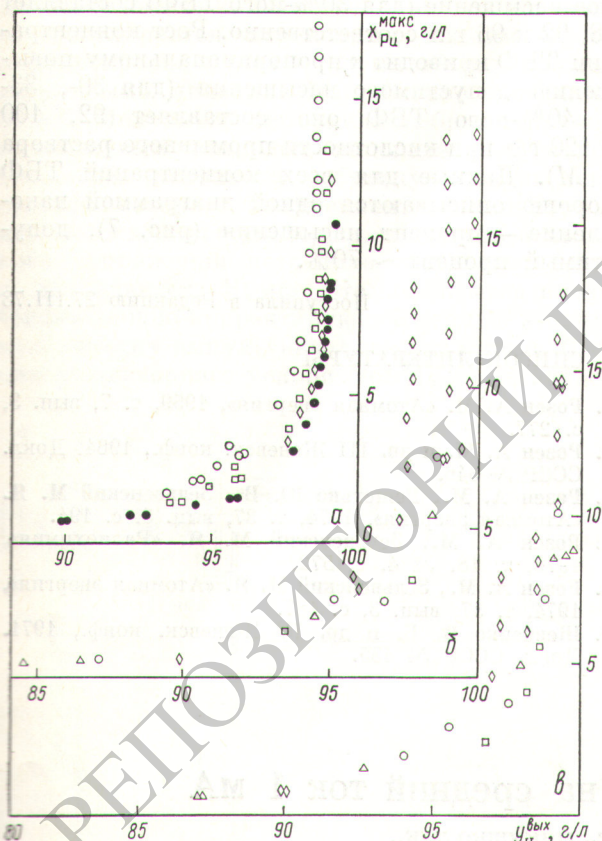


Рис. 4. Зависимость накопления плутония от насыщения экстракта ураном при различных амплитуде  $A$  и периоде  $T$  колебаний отношения потоков:

$a$  — при  $T = 1$  ч и  $A = 10\%$  ( $\circ$ ),  $5\%$  ( $\square$ ),  $2,5\%$  ( $\diamond$ ) и  $0$  ( $\bullet$ );  
 $b$  — при  $T = 3$  и  $6$  ч соответственно и  $A = 10\%$ ;  $n^0 = V/L^0 = 3,3$  ( $\square$ ),  $3,2$  ( $\circ$ ),  $3,1$  ( $\triangle$ ) и  $3,0$  ( $\diamond$ )

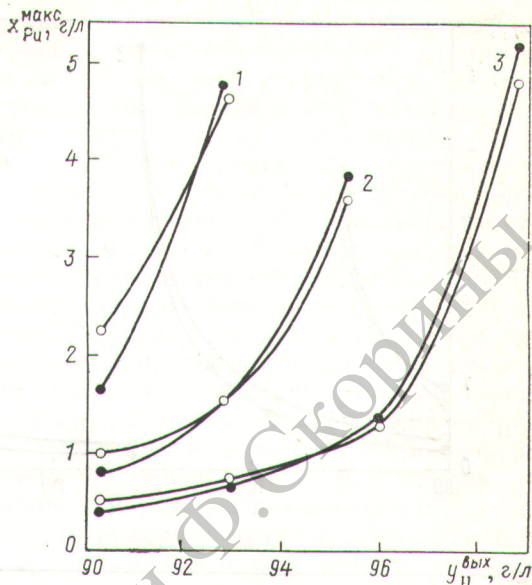


Рис. 5. Зависимость накопления плутония от насыщения экстракта ураном при кислотности промывного раствора 2 ( $1$ ); 3 ( $2$ ) и 5 М ( $3$ ):

$\circ$  — Pu (IV);  $\bullet$  — Pu (VI)

ются режимы, лежащие в области  $a$ , режимы в области  $b$  нежелательны, даже если концентрация плутония и является допустимой, поскольку в этой области и требуется очень высокая точность регулирования; отклонения могут привести к нарушению условий ядерной безопасности (по концентрации делящегося материала).

Результаты исследования влияния колебаний потоков на накопление плутония были представлены на диаграмме накопление — насыщение (рис. 4,  $a$ ,  $b$ ,  $\epsilon$ ). Видно, что колебания лишь очень незначительно смещают границу опасной области  $b$  (см. рис. 3) практически независимо от амплитуды и периода колебаний; до  $y_U^{вых} \leq 95$  г/л процесс протекает в области  $a$ , накопление плутония остается менее 2 г/л.

**Влияние параметров режима на накопление плутония.** Было исследовано также влияние кислотности промывного раствора и концентрации экстрагента (ТБФ) в органической фазе на накопление плутония и допустимое насыщение экстракта ураном: кислотность варьировалась в пределах 2—5 М  $HNO_3$ , концентрация ТБФ — в пределах 30—40%; предполагалось, что часть плутония (20%) в исходном растворе присутствует в шестивалентном состоянии. Как видно из рис. 5 и 6, изменение этих параметров заметно влияет на накопление плутония и допусти-

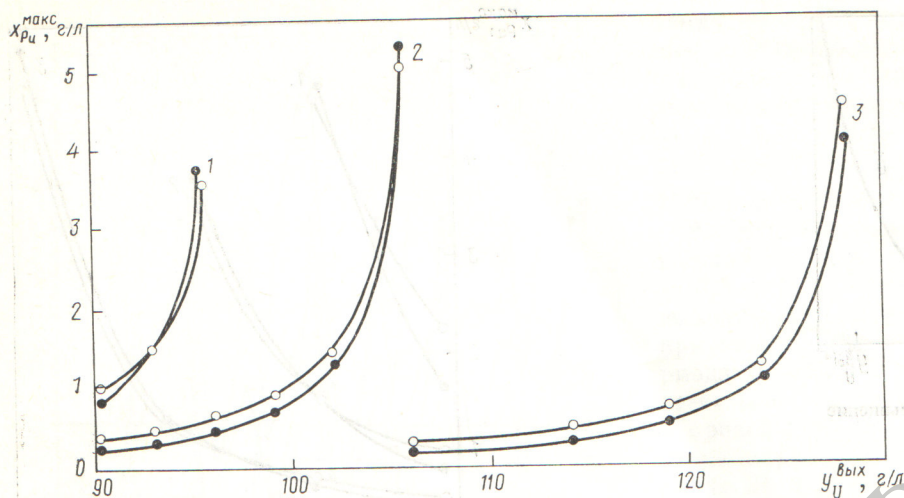


Рис. 6. Зависимость накопления плутония от насыщения экстракта ураном при концентрации экстрагента ТБФ 30 (1), 33 (2) и 40 (3) % (обозначения, как на рис. 5)

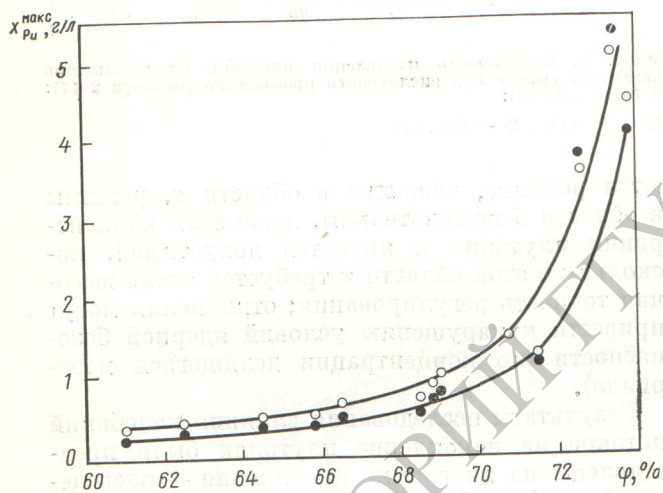


Рис. 7. Зависимость накопления плутония от относительного насыщения экстракта ураном  $\phi$  при кислотности промывного раствора  $3M HNO_3$  (обозначения, как на рис. 5)

мое насыщение экстракта ураном. При кислотности промывного раствора 2, 3 и 5 М допустимое насыщение (для 30%-ного ТБФ) составляет 88, 92 и 96 г/л соответственно. Рост концентрации ТБФ приводит к пропорциональному повышению допустимого насыщения (для 30-, 33- и 40%-ного ТБФ оно составляет 92, 100 и 120 г/л при кислотности промывного раствора 3 М). Данные для всех концентраций ТБФ хорошо описываются одной диаграммой накопления — процент насыщения (рис. 7), допустимый процент  $\sim 70\%$ .

Поступила в Редакцию 27.III.78

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розен А. М. «Атомная энергия», 1959, т. 7, вып. 3, с. 277.
2. Розен А. М. и др. III Женевск. конф., 1964. Докл. СССР № 346.
3. Розен А. М., Решетько Ю. В., Зельвенский М. Я. «Атомная энергия», 1974, т. 37, вып. 3, с. 194.
4. Розен А. М., Зельвенский М. Я. «Радиохимия», 1976, т. 18, № 4, с. 572.
5. Розен А. М., Зельвенский М. Я. «Атомная энергия», 1974, т. 37, вып. 3, с. 187.
6. Шевченко В. Б. и др. IV Женевск. конф., 1971. Докл. СССР № 435.

УДК 621.384.644.3

## Линейный ускоритель электронов на средний ток 1 МА

Фурсов Г. Л., Грижко В. М., Гришаев И. А., Сафронов Б. Г., Мякушко Л. К., Балагура В. С., Белоглазов В. И., Гороховатский Ф. С., Мартынов А. И., Руденко А. П.

Возрастающая потребность народного хозяйства в ускорителях элементарных частиц для решения задач дефектоскопии, активационного

анализа, стерилизации изделий медицинской промышленности, в сельском хозяйстве и других нужд требует создания высокоэффективных