

СТАТЬИ

УДК 621.039.5

СТАБИЛИЗАЦИЯ СОСТАВА ТОПЛИВА В ПОДКРИТИЧЕСКОМ ЖИДКОСОЛЕВОМ РЕАКТОРЕ-СЖИГАТЕЛЕ ТРАНСПЛУТОНИЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Дегтярев А.М., Мясников А.А., Трофимова Т.Е. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)

Для утилизации трансплутониевых элементов в настоящее время прорабатывается возможность их сжигания в специализированных реакторах. Одним из них является жидкосолевой подкритический реактор с внешним источником нейтронов, который является дальнейшим развитием реактора [1]. Реактор имеет классическую для подкритических систем схему из мишени и располагающейся вокруг нее активной зоны. Мишенью служит свинцово-висмутовая эвтектика, в которой генерируются первичные нейтроны под воздействием протонов, поступающих из ускорителя. Активная зона представляет собой цилиндр радиусом 94, высотой 174 см, заполненный солью с растворенными в ней 10,7 т топлива. При глубине подкритичности 0,01 и токе ускорителя 10 мА тепловая мощность в рабочем состоянии достигает 1650 МВт, что позволяет сжигать ~520 кг трансплутониевых элементов за год.

Существенным преимуществом реактора в нейтронно-физическом плане является быстро-промежуточный энергетический спектр нейтронов, что обуславливается использованием соли $\text{LiF}+\text{NaF}+\text{KF}$ с высоким содержанием растворенных актиноидов. Такой спектр в сравнении с тепловым снижает паразитное поглощение на элементах соли растворителя и продуктах деления, а также способствует прямому делению ^{241}Am , преобладающему в составе трансплутониевых элементов. В результате становится возможным автономное сжигание трансплутониевых элементов без привлечения дополнительного запального материала в виде плутония или высокообогащенного урана. Сжигание в реакторе трансплутониевых элементов для наглядности можно описать следующим образом: вводимый в реактор ^{241}Am частично делится, частично в результате радиационного захвата нейтрона и нескольких последующих распадов

переходит в ^{238}Pu , деление которого и завершает трансмутацию. При этом образуются изотопы и других актиноидов от урана до кюрия, заметная доля которых также имеется в составе топлива реактора.

Целью настоящей работы является исследование на качественном уровне устойчивой подпитки реактора, обеспечивающей достижение и последующую стабилизацию равновесного состава топлива в переходный период.

Рассматривали два возможных варианта определения отклонений концентрации топлива от равновесной — косвенным образом по критичности реактора и непосредственный контроль.

Контроль критичности, являющейся основным параметром работающих реакторов, в подкритических системах имеет особенности, среди прочего затрудняющие его реализацию в оперативном режиме. Однако в связи с инерционностью процессов выгорания (за год в реакторе выгорает ~1/20 часть топливной загрузки) неоперативный характер данных об изменении критичности не может служить существенным препятствием для их использования в качестве показателя разбаланса состава. Непосредственный контроль разбаланса топливного состава может представлять более сложную проблему. К тому же область применения такого контроля, по-видимому, ограничивается установившимся режимом работы реактора с достоверно определенным равновесным составом топлива.

Все содержащиеся в топливе актиноиды разделим на две группы — 1) вводимые в реактор в качестве подпитки трансплутониевые актиноиды и 2) остальные более легкие актиноиды (U, Np, Pu), в составе которых преобладают изотопы плутония. Каждую группу будем описывать эффективным элементом с соответствующим номером, при этом полагая, что указанные

элементы имеют одинаковую массу и выход энергии на акт деления. С учетом качественного характера рассмотрения данные приближения не представляются существенными. Уравнения выгорания без учета подпитки запишем в виде

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(\sigma_{f1} + \sigma_R) & 0 \\ \sigma_R & -\sigma_{f2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix} \Phi, \quad (1)$$

где r — массовая концентрация элементов в единице объема; Φ — интегральная по энергии плотность потока нейтронов; σ_f , σ_R — одногрупповые сечения деления и перевода из группы 1 в 2 соответственно. Сечения радиационного захвата в уравнениях (1) отсутствуют, поскольку можно считать, что при этом элемент 2 остается в своей группе, а для элемента 1 радиационный захват в той мере, в которой он переводит входящие в него актиноиды в группу 2, учитывается сечением перевода σ_R . Умножив и разделив правую часть уравнений на $\sum_i \sigma_{fi} r_i$,

введя скорость убыли актиноидов (перевода в результате деления в продукты деления) $w = \sum_i \sigma_{fi} r_i \Phi$, преобразуем уравнения (1) к форме

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix} = \frac{w}{\sum_i \sigma_{fi} r_i} \begin{pmatrix} -(\sigma_{f1} + \sigma_R) & 0 \\ \sigma_R & -\sigma_{f2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Как следует из записи уравнений (2), для микросечений может использоваться произвольный масштаб при условии одинакового по всем микросечениям коэффициента связи с их значениями в общепринятых единицах.

Подпитка реактора должна быть учтена введением в правую часть уравнений (2) дополнительных слагаемых. Представим ее в виде суммы двух компонентов — постоянной базовой и переменной, обеспечивающей управление. Базовая подпитка

$$q_n = w \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

восполняет убыль общей массы актиноидов путем ввода в реактор трансплутониевых элементов. В случае управляющего компонента ограничимся рассмотрением простейшей модели вида

$$q_y = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix} \tilde{a}_k \delta k - a_r \tilde{r}, \quad (4)$$

где δk и

$$\tilde{r} = \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix}_{\text{равн}} \quad (5)$$

— разбаланс критичности и концентрации элементов по отношению к равновесному состоянию соответственно; $\tilde{a}_k$, a_r — свободные постоянные параметры, характеризующие отклик регулирования на разбаланс входных параметров; коэффициент q_i , $i = 1, 2$, равен ± 1 или нулю, если элемент i в составе подпитки для компенсации δk отсутствует. В рамках принятых приближений подпитка безынерционна, т.е. δk и $\tilde{r}$ соответствуют текущему моменту времени.

Будем считать, что изменение состава не оказывает заметного влияния на утечку нейтронов из реактора и для наблюдаемой критичности может быть установлена связь в виде прямой пропорции с бесконечным коэффициентом размножения k_∞ :

$$k_\infty = \frac{\sum_i v_i \sigma_{fi} r_i}{\sum_i \sigma_{ai} r_i + \Sigma_{a,\text{пар}}}, \quad (6)$$

где $\Sigma_{a,\text{пар}}$ — макросечение паразитного по своему характеру поглощения на компонентах соли растворителя и продуктов деления. С учетом этого подставив выражения (3), (4) в уравнения (2) и переобозначив коэффициент при $\begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix}$, получим уравнения выгорания с учетом подпитки

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix} = \frac{w}{\sum_i \sigma_{fi} r_i} \begin{pmatrix} -(\sigma_{f1} + \sigma_R) & 0 \\ \sigma_R & -\sigma_{f2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix} + w \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix} a_k \delta k_\infty - a_r \tilde{r}. \quad (7)$$

Физические константы модели реактора (6), (7) определяли по результатам нейтронно-физических расчетов выхода реактора в установившийся режим, выполненных с применением комплекса MCNP [2] и ORIGEN [3]. Программу MCNP использовали для проведения полномасштабных расчетов реактора с определением его критичности и одногрупповых сечений нуклидов. По программе ORIGEN с использованием полученных сечений моделировали выгорание топлива с учетом подпитки и действия системы очистки соли. Константы элементов 1 и 2 определяли путем усреднения характеристик транс-

плутониевых и более легких актиноидов соответственно в топливе реактора в установившемся состоянии со следующим составом, кг: ^{234}U 43,8, ^{235}U 5,2, ^{236}U 1,1, ^{237}Np 10, ^{238}Pu 2239,4, ^{239}Pu 784,3, ^{240}Pu 833,3, ^{241}Pu 138,7, ^{242}Pu 1268,1, ^{241}Am 3063,4, ^{242}Am 1,3, ^{242m}Am 153,5, ^{243}Am 714,2, ^{244}Am 0,2, ^{242}Cm 258,4, ^{243}Cm 34,8, ^{244}Cm 749,8, ^{245}Cm 231,3, ^{246}Cm 145,5, ^{247}Cm 20,3, ^{248}Cm 11,7, ^{249}Bk 0,3, ^{249}Cf 0,9, ^{250}Cf 0,6, ^{251}Cf 0,1, всего 10 710,3 кг.

При нормировке сечений

$$\sum_i \sigma_{ai} r_i + \Sigma_{a,\text{пар}} = 1 \text{ г/см}$$

получены следующие константы: $\sigma_{a1} = 0,81 \text{ см}^2$, $\sigma_{a2} = 0,616 \text{ см}^2$, $\sigma_{f1} = 0,2 \text{ см}^2$, $\sigma_{f2} = 0,346 \text{ см}^2$, $\eta_1 = 0,88$, $\eta_2 = 1,69$, $\sigma_R = 0,342 \text{ см}^2$, $\Sigma_{a,\text{пар}} = 0,079 \text{ г/см}$. При этом $k_{\infty,\text{равн}} = 1,1275$, $w = 0,0645 \text{ г/см}^3 \text{ в год}$, $r_{1,\text{равн}} = 0,649 \text{ г/см}^3$, $r_{2,\text{равн}} = 0,641 \text{ г/см}^3$. Выход нейтронов деления на один поглощенный нейтрон η_i показывает, что первый элемент выступает как поглотитель, уменьшая при введении критичность, второй элемент, напротив, увеличивает критичность.

Стационарное уравнение, соответствующее уравнению (7) при отсутствии регулирования, имеет вид

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{w}{\sum_i \sigma_{fi} r_i} \begin{pmatrix} -(\sigma_{f1} + \sigma_R) & 0 \\ \sigma_R & -\sigma_{f2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \end{pmatrix} + w \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Его решением служит прямая

$$r_1 \sigma_R - r_2 \sigma_{f2} = 0, \quad (9)$$

на которой и лежит точка равновесия $r_{1,\text{равн}}$, $r_{2,\text{равн}}$ с отвечающим этой концентрации коэффициентом размножения $k_{\infty,\text{равн}}$. Прямую, которую описывает выражение (9), образует асимптотическая концентрация актиноидов при $t \rightarrow \infty$ при выгорании из начального состояния с различной концентрацией без управляющей подпитки. При этом общее содержание актиноидов $r_1 + r_2$ при $t \rightarrow \infty$ равно начальному.

Устойчивость системы уравнений (7) относительно точки равновесия при разном регулировании рассматривали для двух ситуаций: при малых $\tilde{\mathbf{r}} \sim 0$ и больших отклонениях без этого ограничения. Первая ситуация характерна для

установившегося режима работы реактора, вторая — для начального, предшествующего выходу в установившийся режим. В каждом случае использовали индивидуальный подход к исследованию устойчивости [4].

В первом случае находили линеаризованное представление выражения (6) и уравнения (7) в окрестности точки равновесия:

$$\delta k_{\infty} = k_{\infty} - k_{\infty,\text{равн}} = \left(\sum_i \sigma_{ai} r_i + \Sigma_{a,\text{пар}} \right)^{-1} \times \\ \times \left(v \sigma_{f1} - \sigma_{a1} k_{\infty,\text{равн}} \quad v \sigma_{f2} - k_{\infty,\text{равн}} \sigma_{a2} \right) \begin{pmatrix} \tilde{r}_1 \\ \tilde{r}_2 \end{pmatrix}; \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \tilde{r}_1 \\ \tilde{r}_2 \end{pmatrix} = \frac{w}{\sum_i \sigma_{fi} r_{i,\text{равн}}} \times \\ \times \left(\begin{pmatrix} -(\sigma_{f1} + \sigma_R) & (\sigma_{f1} + \sigma_R) \sigma_{f1} r_{1,\text{равн}} \\ \sigma_R & \sum_i \sigma_{fi} r_{i,\text{равн}} \end{pmatrix} \frac{(\sigma_{f1} + \sigma_R) \sigma_{f2} r_{1,\text{равн}}}{\sum_i \sigma_{fi} r_{i,\text{равн}}} \right) \begin{pmatrix} \tilde{r}_1 \\ \tilde{r}_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \end{pmatrix} a_k \delta k_{\infty} - a_r \tilde{\mathbf{r}}, \quad (11)$$

где при выводе второго выражения учтено равенство (9). Подставив в систему уравнений (11) δk_{∞} из выражения (10) и введя матрицу $\mathbf{A}$ для обозначения суммы выражений при $\tilde{\mathbf{r}}$, преобразуем систему к виду

$$\frac{d}{dt} \tilde{\mathbf{r}} = \mathbf{A} \tilde{\mathbf{r}}. \quad (12)$$

Система уравнений (12) устойчива относительно точки равновесия $\tilde{\mathbf{r}} = 0$, т.е. отклонения от этой точки при $t \rightarrow \infty$ обращаются в нуль, когда собственные числа λ_i матрицы $\mathbf{A}$ или их действительная часть меньше 0. Такой вид устойчивости называется асимптотическим.

При больших отклонениях вектор $\mathbf{r}$ в системе уравнений (7) заменяли с использованием соотношений (5) на вектор $\tilde{\mathbf{r}}$ и δk_{∞} определяли непосредственно по выражению (6). Устойчивость в этом случае доказывается построением функции Ляпунова $V(\tilde{r}_1, \tilde{r}_2)$ [5], которая по определению должна обладать следующими свойствами:

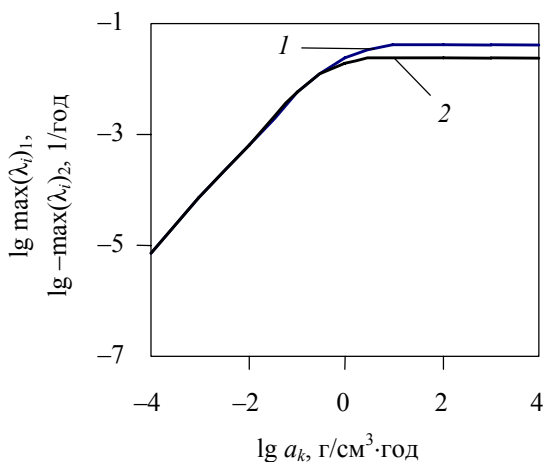
в точке равновесия $\tilde{\mathbf{r}} = 0$ $V(0, 0) = 0$;
вне точки $\tilde{\mathbf{r}} = 0$

$$V(\tilde{r}_1, \tilde{r}_2) > 0;$$

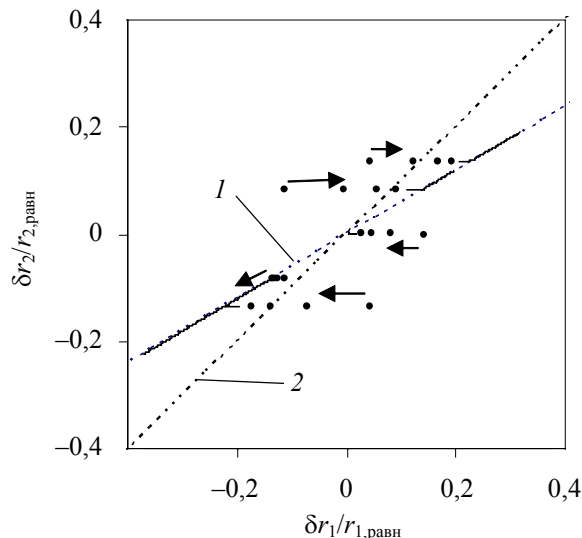
$$\frac{d}{dt}V(\tilde{r}_1, \tilde{r}_2) = \frac{\partial V(\tilde{r}_1, \tilde{r}_2)}{\partial \tilde{r}_1} \frac{d\tilde{r}_1}{dt} + \frac{\partial V(\tilde{r}_1, \tilde{r}_2)}{\partial \tilde{r}_2} \frac{d\tilde{r}_2}{dt} < 0. \quad (13)$$

Проанализируем устойчивость некоторых конкретных режимов регулирования, которые могут быть описаны в рамках рассмотренной модели.

В случае регулирования по разбалансу критичности с использованием трансплутониевой фракции (элемент 1) в исходной системе уравнений (7) $a_k > 0$, $q_1 = 1$, $a_r = q_2 = 0$. При таком согласовании знаков a_r и q_1 элемент 1 дополнительно вводится в реактор при $\delta k_\infty > 0$ и выводится в противоположной ситуации, что отвечает характеру его влияния на критичность. В этом случае $\max(\lambda_i) > 0$, т.е. имеет место неустойчивость даже при малых отклонениях (рис. 1). Для оценки параметра a_k полезно отметить, что, например, при $|\delta k_\infty| = 0,001$ управляющая подпитка становится равной базовой по абсолютному значению при $a_k = w/|\delta k_\infty| = 64,5$ г/см³ в год. Изменение со временем отклонений концентрации $\tilde{\mathbf{r}}$ для разных начальных состояний, рассчитанное по уравнениям (7) и выражению (6), показано на рис. 2. Уже в начальный период регулирования большая часть дисбаланса критичности устраняется. Однако в отношении концентрации топлива регулирование оказывается неэффективным, что проявляется в увеличении разбаланса концентрации $\tilde{\mathbf{r}}$ после выхода на линию $\delta k_\infty \sim 0$. Более того, со



Р и с. 1. Зависимость максимального собственного числа $\max(\lambda_i)$ системы уравнений (12) от коэффициента a_k при регулировании с использованием трансплутониевой (1) и плутониевой фракции (2)



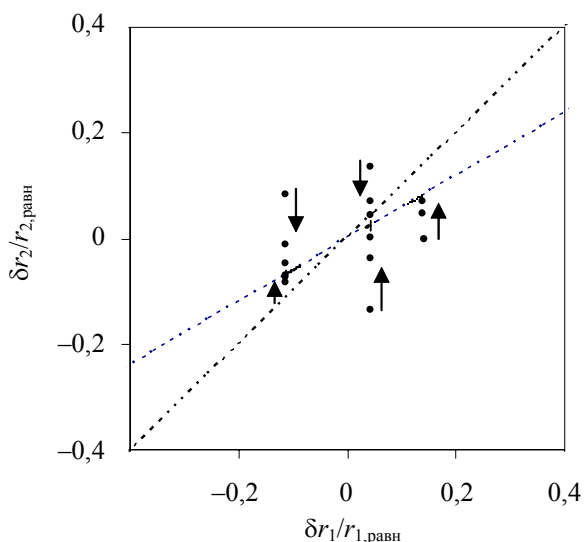
Р и с. 2. Временная зависимость отклонения концентрации $\tilde{\mathbf{r}}$ при регулировании в течение 10 лет по разбалансу критичности с использованием трансплутониевой фракции для $a_k = 32,25$ г/см³ в год: 1 — отклонения с сохранением заданной критичности $\delta k_\infty = 0$ (см. выражение (10)); 2 — решение стационарных уравнений выгорания с подпиткой (см. уравнения (8), (9)); → — направление изменения; ·, — — отклонение концентрации в момент начала регулирования и через 1, 2, 3 мес соответственно

временем начинает наблюдаться и монотонный рост разбаланса критичности $|\delta k_\infty|$, из-за своей малости незаметный на рис. 2.

При регулировании по разбалансу критичности с использованием плутониевой фракции (элемент 2) в системе уравнений (7) $a_r = q_1 = 0$ и q_2 следует положить равным -1 при $a_k > 0$ в соответствии с положительным влиянием элемента 2 на критичность. Для малых отклонений регулирование показало себя устойчивым (см. рис. 1). Изменение $\tilde{\mathbf{r}}$ со временем на рис. 3, аналогичное приведенному на рис. 2, позволяет предполагать устойчивость регулирования и при больших начальных отклонениях. Функции Ляпунова, доказывающие это свойство, были построены с учетом изменения характера $\tilde{\mathbf{r}}$ в виде

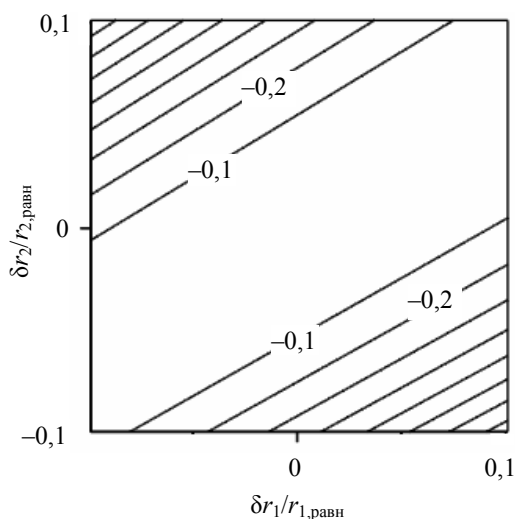
$$V(\tilde{r}_1, \tilde{r}_2) = (a_1\tilde{r}_1 + a_2\tilde{r}_2)^2 + b(a_2\tilde{r}_1 - a_1\tilde{r}_2)^2, \quad (14)$$

где $a_i = (\sum_j (\nu\sigma_{fj} - \sigma_{aj}k_{\infty, \text{равн}})^2)^{-1/2}(\nu\sigma_{fi} - \sigma_{ai}k_{\infty, \text{равн}})$, $i = 1, 2$ — координаты вектора нормали $\mathbf{a}$ к прямой (10); b — свободный коэффициент. Таким образом, функция $V(\tilde{r}_1, \tilde{r}_2)$ складывается из квадрата перпендикуляра, опущенного из точки $\tilde{\mathbf{r}}$ на прямую $\delta k_\infty = 0$ (см. выражение (10)), и квадрата расстояния от основания этого перпендикуляра



Р и с. 3. То же, что и на рис. 2, при использовании для регулирования плутониевой фракции при $a_k = 32,25$ г/см³ в год

до точки равновесия, взятого с коэффициентом b [6]. Заметим, что связь $\tilde{r}_1$ и $\tilde{r}_2$, которую устанавливает выражение (10) при $\delta k_\infty = 0$, справедлива и в общем случае без предположения малости отклонений $\tilde{r}$. Коэффициент b в зависимости от параметра a_k подбирали из условия обеспечения условий (13). Например, для параметра a_k , равного 0,3225, 32,25 и 3225 г/см³ в год, коэффициент b был получен равным 10^{-1} , 10^{-2} и $2 \cdot 10^{-5}$ соответственно, для $a_k = 32,25$ г/см³ в год значения $dV(\tilde{r}_1, \tilde{r}_2)/dt$ приведены на рис. 4. Отметим, что данное регулирование не подразумевает обязательного привлечения дополнительного плутония, поскольку с этой целью может использоваться плутоний из системы очистки соли. Ана-



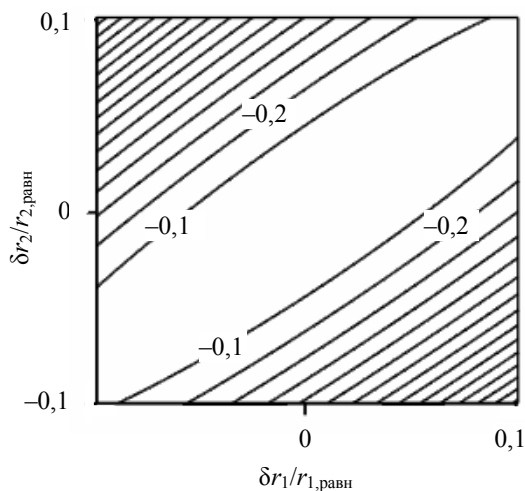
Р и с. 4. Производная функции Ляпунова по времени при использовании для регулирования плутониевой фракции при $a_k = 32,25$ г/см³ в год, $b = 10^{-2}$

логичным образом топливо из системы очистки может использоваться и при других видах регулирования.

Различие рассмотренных режимов регулирования по устойчивости обусловливается изменением с отрицательного на положительное влияния на критичность трансплутониевой фракции (элемент 1) по мере ее перехода в плутониевую (элемент 2), в то время как для плутония такой неоднозначности нет. Отметим, что выявленная с применением простейшей модели неустойчивость регулирования с использованием трансплутониевой фракции первоначально была обнаружена в ходе полномасштабного расчетного моделирования перевода реактора в установившийся режим работы с помощью программного комплекса MCNP и ORIGEN.

Составом топлива по разбалансу критичности можно управлять и при использовании одновременно обеих фракций. Режим регулирования с $q_1 = 1$, $q_2 = -1$ обеспечивает постоянство общей концентрации топлива в реакторе, что является преимуществом при актуальности ограничений на растворимость соли. В этом случае с течением времени отклонение $\tilde{r}$ стабилизируется в точке вблизи прямой $\delta k_\infty = 0$ с тем же отклонением общей концентрации топлива $\tilde{r}_1 + \tilde{r}_2$, что и на момент начала регулирования. Если сохранить знаки q_1 , q_2 и изменить соотношение между их абсолютными значениями, то при $|q_1| > |q_2|$ регулирование становится неустойчивым, в противоположной ситуации — устойчивым.

Устойчивость регулирования по разбалансу концентрации $\tilde{r}$ очевидна по физическим соображениям и не требует специального рассмотрения. Интерес представляет совместное использование этого вида регулирования в качестве стабилизирующего фактора с регулированием по разбалансу критичности. Рассмотрим регулирование с $q_1 = 1$, $q_2 = -1$, дополненное членом $-a_r \tilde{r}$ с $a_r > 0$. Данный режим регулирования, как и предыдущий, обеспечивает постоянство суммарной концентрации топлива в ходе регулирования, но в отличие от него устойчив при любых сочетаниях параметров a_k и a_r . Для малого отклонения это свойство следует из соотношения между матрицей A в рассматривае-



Р и с. 5. То же, что и на рис. 4, при комбинированном регулировании по разбалансу критичности и концентрации для $a_k = 32,25 \text{ г/см}^3$ в год, $a_r = 1 \text{ год}^{-1}$, $b = 10^{-1}$

мом режиме и матрицей A' предыдущего режима (см. уравнения (11), (12)):

$$A = A' - a_r I,$$

где I — единичная матрица. Отсюда, учитывая, что для матрицы A' $\max(\lambda_i) = 0$, в случае матрицы A имеем

$$\max(\lambda_i) = -a_r < 0.$$

Для больших начальных отклонений устойчивость была показана с использованием функции Ляпунова вида (14), пример значений производной функции Ляпунова $dV(\tilde{r}_1, \tilde{r}_2)/dt$ показан на рис. 5.

Таким образом, исследование простых моделей показывает невозможность достижения равновесного состояния реактора и его поддер-

жания путем варьирования ввода трансплутониевых элементов исходя из наблюдаемого разбаланса критичности. Более перспективно регулирование с использованием плутониевой фракции, устойчивое при тех же приближениях. В установившемся режиме работы реактора устойчивая подпитка может быть организована на основе контроля фактического разбаланса концентрации нуклидов.

Авторы выражают признательность Л.И. Пономареву за поддержку работы.

Работа выполнена в рамках Государственного контракта № Н.4ф.45.90.11.1020 «Оптимизация характеристик реакторов-пережигателей минорных актинидов и разработка их топливного цикла».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дегтярев А.М., Калугин А.К., Коляскин О.Е. и др. Каскадный подкритический жидкофазовый реактор для сжигания трансплутониевых актиноидов. — Атомная энергия, 2006, т. 101, вып. 2, с. 116—125.
2. MCNP — a General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 4B. LA-12625-M, 1997.
3. ORIGEN 2.1 — Isotope Generation and Depletion Code — Matrix Exponential Method. ORNL, CCC-371, 1996.
4. Мышкис А.Д. Прикладная математика для инженеров. Специальные курсы. М.: Физматлит, 2007.
5. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Наука, 1986.

Поступила в Редакцию 26.08.11

УДК 621.039.51.17

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЕ ЭТАПЫ ОСВОЕНИЯ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ С НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Багдасаров Ю.Е., Камаев А.А. (ГНЦ РФ — ФЭИ, г. Обнинск)

Развитие быстрых реакторов в мире охватывает период около 60 лет. Наиболее продуманная и последовательная программа их развития была выполнена в нашей стране, причем с самого начала приоритет был отдан быстрым реакторам с натриевым охлаждением [1]. В настоящее время наша страна обладает наибольшим опытом разработки и эксплуатации натриевых бы-

стрых реакторов — около 140 реакторо-лет. Важным показателем этого опыта является надежность, которая выражается в ресурсе натриевого оборудования без капитального ремонта (табл. 1). Другим показателем надежности является ее независимость от конкретных предприятий-разработчиков той или иной реакторной установки (табл. 2). Этапы развития и их резуль-