

УДК 621.039.524

ПРИМЕНЕНИЕ НОМОГРАММ ДЛЯ РАСЧЕТА ОТРАВЛЕНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕАКТОРА САМАРИЕМ

А.В. Кузьмин

Томский политехнический университет
E-mail: kuzminav@tpu.ru

С позиции точечной модели обсуждаются особенности расчета отравления самарием теплового реактора в режиме останова. Показаны принцип составления и применение номограмм для оценки потери реактивности. Предложены новые номограммы режимов пуска и останова. Проведено сравнение с нестационарной задачей, решенной графоаналитическим методом.

Введение

Самарий $^{149}_{62}\text{Sm}$ замыкает одну из цепочек радиоактивного распада осколков деления уранового топлива. Его основные особенности: высокое эффективное микроскопическое сечение поглощения в тепловой области $\sigma_{\text{sm}}(0,0253 \text{ эВ}) = 5 \cdot 10^4$ барн и стабильность определяют характер поведения отравления теплового реактора этим изотопом. Равновесное отравление Sm определяется в основном свойствами ядерного топлива и не зависит от мощности реактора, поэтому для многих типов тепловых реакторов оно имеет близкое друг к другу значение. Динамичность поведения самария в активной зоне реактора придает его предшественник — $^{149}_{61}\text{Pm}$, период полураспада которого составляет $T_{1/2}(\text{Pm}) \equiv T_{\text{Pm}} \approx 2,23$ суток. Влияние прометия особенно существенно сказывается в режиме останова реактора.

Потеря реактивности в прометиевом провале может существенно повлиять на маневренные характеристики реактора. Для своевременной оценки этого эффекта оператором весьма удобным оказалось применение номограммы, впервые предложенной в работе [1]. Номограммы могут быть построены на основе численных расчетов динамики отравления самарием теплового реактора в многомер-

ном фазовом пространстве. Однако, практика показала высокую эффективность точечной модели, что дало возможность применять аналитические решения для ее построения. Принцип составления номограммы, расширение возможностей этого метода для других переходных режимов рассматривается во второй части работы.

Следует заметить, что в качестве иллюстративного теплового реактора принят условный тепловой реактор (УТР) [2], а данная работа является логичным продолжением [3].

1. Режимы останова реактора с мощности N_1

С точки зрения отравления реактора самарием выделим следующие режимы останова:

- со стационарного по самарию и прометию уровня мощности;
- со стационарного по самарию и нестационарного по прометию уровня;
- со стационарного по прометию и нестационарного по самарию;
- с нестационарного по прометию и по самарию уровня мощности.

Вклад отравления самарием в этих режимах схематично представлен на рис. 1.

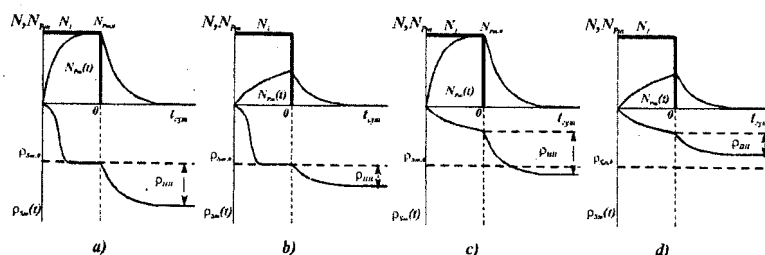


Рис. 1. Вклад отравления самарием в различных режимах останова ($N_2=0$)

Приведем выражение для глубины прометиевого провала в любой момент времени $\rho_{\text{пл}}(t)$ в обозначениях, принятых нами в работе [3], и уточним некоторые формулировки для лучшего понимания дальнейшего изложения:

$$\rho_{\text{пл}}(t) = \rho_{\text{пл}}(N_i) \left[1 - \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot t}{T_{\text{Pm}}}\right) \right], \quad (1)$$

где $\rho_{\text{пл}}(N_i)$ – значение максимума прометиевого провала для такой мощности N_i , которой соответствует фактическая концентрация прометия на момент останова реактора.

Подчеркнем основные особенности этих режимов.

Они характеризуются, прежде всего, тем, что весь имеющийся в активной зоне реактора на момент останова прометий со временем распадается, тем самым, увеличивая концентрацию самария и связанную с ним потерю реактивности на отравление.

Так как период полураспада прометия равен $T_{\text{Pm}} \approx 2,23$ сут, то через 11,5 сут. (с погрешностью около 3 % через 5 периодов полураспада) глубина прометиевого провала в соответствии с (1) достигнет максимума. Очевидно, что точно также будет протекать и достижение равновесной концентрации $^{149}_{61}\text{Pm}$ на новой рабочей мощности реактора N_2 .

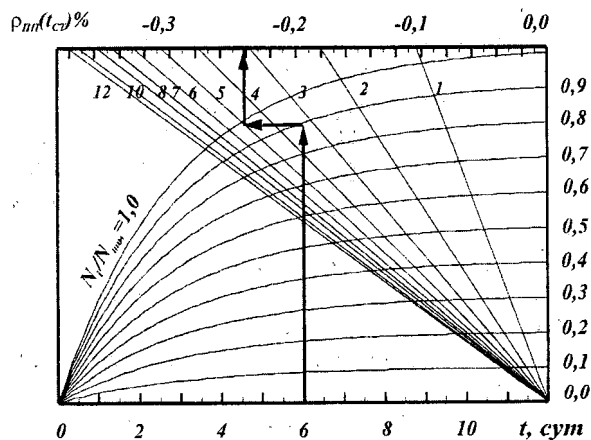


Рис. 2. Номограмма режима пуска свежего УТР

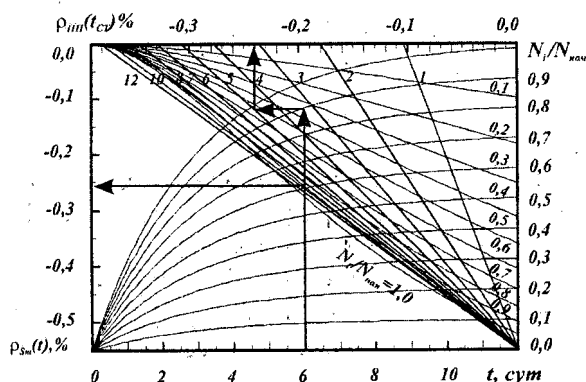


Рис. 3. Принцип работы с номограммой режимов пуска свежего УТР и останова

Равновесное отравление самарием и максимальная глубина прометиевого провала при останове с номинальной мощности отличаются для разных типов тепловых реакторов. Для УТР равновесное отравление равно $-\rho_{\text{Sm},0} = -0,7\%$ [2], а максимальный провал $\rho_{\text{пл}}^{\text{ном}} \approx -0,39\%$ по уточненным данным работы [3].

Глубина прометиевого провала пропорциональна фактической концентрации прометия в зоне

$$\rho_{\text{пл}}(N_i) = \rho_{\text{пл}}(N_{\text{НОМ}}) \frac{N_i}{N_{\text{НОМ}}} \approx -\frac{0,39}{100} N_i. \quad (2)$$

Качественный характер зависимости видно из сравнения режимов а) и б) или с) и д).

Если останов произошел с номинальной мощности и при этом уже были достигнуты равновесные концентрации прометия и самария, см. рис. 1, режим а, то отравление самарием приблизительно через 11 сут. примет какое-то предельное для данного реактора значение. Так, например, уточненное предельное значение для УТР [3] будет равно

$$\rho_{\text{Sm}}^{\text{lim}} = \rho_{\text{Sm},0} + \rho_{\text{пл}}(100\%) \approx -1,09\%.$$

По порядку абсолютных значений эффектов отравления $^{149}_{62}\text{Sm}$ почти на порядок меньше отравления $^{135}_{54}\text{Xe}$.

Однако необходимо помнить, что если отравление ксеноном в зависимости от плотности потока тепловых нейтронов носит «насыщающий» характер и по оценкам в максимуме йодной ямы не будет превышать приблизительно -10% , то глубина прометиевого провала нарастает пропорционально потоку и может привести к «самариевой смерти» реактора. Это обстоятельство ограничивает диапазон изменения потока тепловых нейтронов в реакторе и требует его постоянного контроля.

2. Номограммный метод расчета отравления теплового реактора самарием в режимах пуска свежего реактора и останова

Номограммные методы расчета в инженерной практике нашли широкое применение. Использование номограммы в расчете отравления самарием было впервые предложено в работе [1] для режима останова. Номограмма выполнена в относительных единицах реактивности, т.е. применима для любого теплового реактора и позволяет определять глубину прометиевого провала при останове с различного уровня мощности или фактической концентрации прометия. Чтобы определить абсолютное значение отравления самарием в прометиевом провале, необходимо умножить результат, снимаемый с номограммы на величину максимальной глубины прометиевого провала конкретного реактора. Для других режимов номограммы отсутствуют, хотя необходимость их очевидна.

Рассмотрим основные принципы составления номограммы [1] на примере УТР.

Накопление прометия при работе реактора на уровне мощности N_i протекает по следующему закону

$$\frac{N_{Pm}(t)}{N_{Pm,0}^{ном}} = \frac{N_i}{N_{ном}} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot t}{T_{Pm}}\right)\right).$$

Именно эта величина будет определять потенциальную глубину прометиевого провала на момент останова реактора $\rho_{ПП}(N_i)$. На рис. 2 это уравнение представлено семейством кривых для разных уровней мощности $N_i/N_{ном}$ с началом в нижнем левом углу.

Изменения реактивности в прометиевом провале в зависимости от времени стоянки $t_{СТ}$ будет иметь вид

$$\rho_{ПП}(t_{СТ}) = \rho_{ПП}(N_i) \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{Pm}} \cdot t_{СТ}\right)$$

или с учетом уравнения (2)

$$\rho_{ПП}(t_{СТ}) = \rho_{ПП}^{ном} \cdot \frac{N_i}{N_{ном}} \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{Pm}} \cdot t_{СТ}\right).$$

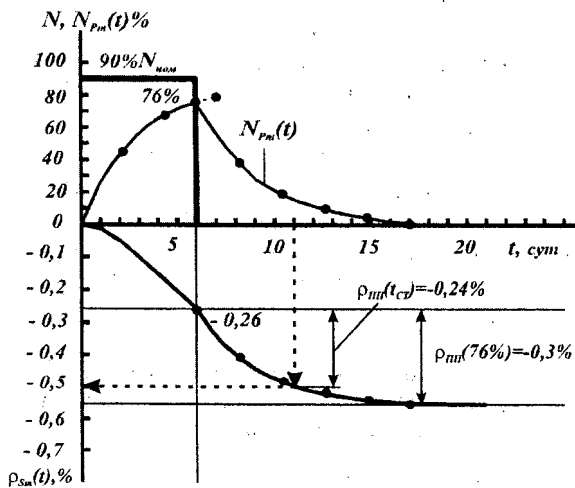


Рис. 4. Решение тестовой задачи графоаналитическим методом

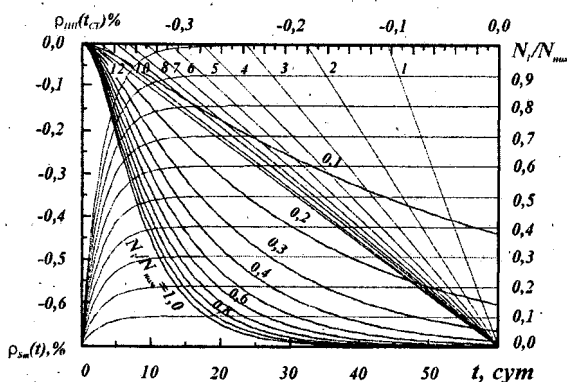


Рис. 5. Номограмма режимов пуска свежего УТР и останова

Это уравнение представлено рядом прямых для значений времени стоянки $t_{СТ}$ от 1 до 12 сут.

Номограмма [1] широко использовалась на практике и в настоящее время применяется для подготовки эксплуатационного персонала водо-водяных энергетических реакторов типа ВВЭР.

В работах [4, 5] на примере УТР ставилась задача создания номограммы расчета отравления самарием в режимах пуска свежего реактора и останова, что значительно расширяет возможности номограммных методов в определении самариевого отравления. Принципиальные схемы этих режимов представлены на рис. 1.

Отравление самарием в режиме пуска свежего реактора в зависимости от периодов полувыворачивания Sm и Pm описывается следующим уравнением:

$$\rho_{Sm}(t) = \rho_{Sm,0} \left[1 + \frac{T_{Pm}}{T_{Sm}^* - T_{Pm}} \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot t}{T_{Pm}}\right) - \frac{T_{Sm}^*}{T_{Sm}^* - T_{Pm}} \exp\left(-\frac{\ln 2 \cdot t}{T_{Sm}^*}\right) \right], \quad (3)$$

где период полувыворачивания самария в соответствии с работой [2] имеет вид

$$T_{Sm}^* = \frac{\ln 2}{\sigma_{Sm} \Phi_2} \approx \frac{16 \cdot 10^{13}}{\Phi_2} = 4 \frac{N_{ном}}{N_2} \text{ сут.}$$

Здесь Φ_2 – средняя плотность потока нейтронов в реакторе, нейтрон/(см²·с), соответствующая мощности N_2 , %, на которой работает реактор (в этом режиме исходная мощность $N_1=0$).

На рис. 3 ур. (3) определяется серия кривых с началом в левом верхнем углу графика в зависимости от относительного уровня мощности $N_i/N_{ном}$.

Принцип пользования номограммой показан на рис. 2 и 3 для нижеприведенной нестационарной задачи, когда концентрация по прометию $N_{Pm}(t)$ и самарию $N_{Sm}(t)$ не достигла еще их равновесных значений.

Условный тепловой реактор со свежей загрузкой топлива на мощности $N = 90\%$ от номинальной $N_{ном}$ работал в течение 6 суток, а затем был остановлен. В режиме останова реактор находился еще 5 сут. Требуется оценить потери реактивности на отравление $^{149}_{62}\text{Sm}$ на момент окончания 5 суток стоянки.

На рис. 4 эта задача решена графоаналитическим методом.

По номограмме, изображенной на рис. 2, можно найти только потерю реактивности $\rho_{ПП}(t_{СТ})$ в прометиевом провале на момент времени стоянки

Новая номограмма (рис. 3), кроме этого, учитывает потерю реактивности $\rho_{Sm}(t_{раб.})$ за счет отравления самарием, накопившимся за время работы $t_{раб.}$

Очевидно, что результат в отличие от графоаналитического метода достигается намного быст-

рее и определяется только суммированием показаний верхней и боковой шкал:

$$\rho_{III}(t_{CT}) + \rho_{Sm}(t_{раб.}) = \\ = -0,242 - 0,258 = -0,5\%.$$

Заключение

Предложена новая номограмма для определения отравления самарием $^{149}_{62}\text{Sm}$ в режимах пуска свежего реактора и его останова.

Точность номограммы можно улучшить, разбив ее на несколько интервалов по времени. Наиболее практически значимыми и удобными, на наш взгляд, шкалами t являются: интервалы времени – 0...12 и 0...60 суток. Первая номограмма со шкалой

времени 0...12 суток (рис. 3) обеспечивает наиболее высокую точность в расчетах прометиевого провала, вторая – со шкалой 0...60 (рис. 5) – расширяет диапазон расчетов установления равновесного отравления самарием.

Кроме того, номограмма, представленная на рис. 5, более наглядна в сравнении динамики развития обоих эффектов и может быть применена для расчетов графоаналитическим методом других режимов отравления.

Получаемые номограммным методом значения параметров отравления отличаются достаточной точностью, а использование номограмм является для обучения оперативного персонала более удобным с точки зрения наглядности методом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саркисов А.А., Пучков В.Н. Физические основы эксплуатации ядерных паропроизводящих установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 504 с., ил.
2. Владимиров В.И. Практические задачи по эксплуатации ядерных реакторов. Изд. 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Атомиздат, 1986. – 304 с., ил.
3. Валуев И.Б., Горлов Р.П., Кузьмин А.В. Изменение отравления условного теплового реактора самарием на переменных режимах // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Том 306. – № 2. – С. 67–71.
4. Горлов Р.П., Кузьмин А.В. Номограммы для расчета отравления самарием в режимах пуска свежего реактора и останова // Энергетика: экология, надежность, безопасность. Матер. VI Всеросс. научно-техн. конф. – Томск, 2000. – Т. 1. – С. 194–196.
5. Горлов Р.П., Кузьмин А.В. Номограммный метод расчета отравления самарием в режимах пуска свежего реактора и останова // Современные техника и технологии: Труды VII Междунар. научно-практ. конф. молодых ученых. – Томск, 2001. – Т. 1. – С. 69–71.

УДК 532.6

МИКРОПЛАЗМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ЖИДКОСТЬ/ЖИДКОСТЬ В ПОТЕНЦИОСТАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ

В.А. Мамаева*, А.И. Мамаев**

*Институт физики прочности и материаловедения СО РАН. г. Томск

**ООО «Техника и технология электрохимии». г. Томск

E-mail: aim@galore.tomsk.ru, atte@mail.tomsknet.ru

Обнаружено новое явление – возникновение микроплазменных процессов на границе раздела двух жидких фаз. Проведено теоретическое моделирование начальных стадий возникновения микроплазменных процессов за счет изменения концентраций реагирующих веществ и напряженности электрического поля вблизи и на границе раздела двух жидких фаз в потенциостатическом режиме при высоковольтной поляризации границы раздела фаз.

Высоковольтные электрохимические и микроплазменные процессы, протекающие на границе металлический электрод-электролит, находят все более широкое применение для получения многофункциональных оксидных керамических покрытий, обработки медицинских препаратов, изделий и инструментов. Теоретические и технологические вопросы для этих процессов достаточно развиты [1–4].

Внешние электрические поля оказывают существенное воздействие на физико-химические процессы в жидкостях. Особое влияние внешние электрические поля высокого напряжения оказывают на

границу раздела фаз. Физические процессы в жидкости проявляются как поляризационные в ее объеме и на границе раздела фаз, поляризация влияет на скорость химических реакций и фазовые превращения [5].

Обнаружено новое явление при высоковольтной поляризации границы двух жидких фаз – возникновение микроплазменных процессов [6].

Теоретическое описание сложных гетерогенных систем, и математическое моделирование кинетики сложных гетерогенных химических, электрохимических и микроплазменных процессов на грани-