

обнаружены две эвтектики при содержании UCl_4 31,00 и 44,00 мол. %, имеющие температуры плавления 415 ± 2 и $400 \pm 2^\circ C$ соответственно, и соединения $2LiCl \cdot UCl_4$, плавящееся конгруэнтно при $430 \pm 2^\circ C$. В отличие от данных работы [1], в которой не изучалась область 75—100 мол. % UCl_4 , нами установлено существование твердого раствора UCl_4-UCl_3 . В тройной системе $LiCl-UCl_3-UCl_4$ (см. рисунок) изучено десять политермических разрезов, проходящих через вершину концентрационного треугольника (соответствующего составу $LiCl$) и противоположную сторону. В этой системе определены четыре поля кристаллизации: UCl_4 , $2LiCl \cdot UCl_4$, $LiCl$ и UCl_3 . Квазибинарное сечение $UCl_3-2LiCl \cdot UCl_4$ делит систему на две вторичные простые эвтектические системы. Эвтектическая точка (E_1), образованная полями кристаллизации UCl_4 , $2LiCl \cdot UCl_4$ и UCl_3 , характеризуется температурой плавления $290 \pm 2^\circ C$ и соответствует составу (в мол. %): 50,00 $LiCl$, 10,00 UCl_3 и 40,00 UCl_4 . Поля кристаллизации $2LiCl \cdot UCl_4$,

$LiCl$ и UCl_3 сходятся, образуя эвтектику (E_2) с температурой плавления $350 \pm 2^\circ C$, соответствующую составу (в мол. %): 68,00 $LiCl$, 13,00 UCl_3 и 19,00 UCl_4 .

Поступило в Редакцию 9/VI 1971 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Reactor Handbook. Vol. 1, Materials. New York, 1960, p. 425.
2. В. Н. Десятник и др. «Атомная энергия», 26, 549 (1969).
3. Д. Ж. Кац, Е. Рабинович. Химия урана. Т. I. М., Изд-во иностр. лит., 1954.
4. В. Н. Десятник, И. Ф. Ничков, С. П. Распопин. «Изв. вузов. Цветная металлургия», № 5, 95 (1969).
5. Справочник по расплавленным солям. Пер. с англ. Под ред. А. Г. Морачевского. М., «Химия», 1971.

Об оптимизации реактора для физических исследований профилированием горючего

Т. С. ЗАРИЦКАЯ, Ю. В. ПЕТРОВ, А. П. РУДИК, Э. Г. САХНОВСКИЙ

УДК 621.039.51

В работе [1] для оценки реакторной составляющей затрат на получение информации в экспериментах на стационарном реакторе предложен функционал вида

$$I = \frac{P}{\Phi(r_{\max})} \left(\frac{1}{yG} + \frac{1}{P} \right), \quad (1)$$

где P — мощность реактора; y — средняя глубина выгорания в выгружаемых твэлах; $\Phi(r)$ — поток тепловых нейтронов; r_{\max} — точка максимума функции $\Phi(r)$ в отражателе; G — заданная постоянная. Представляет интерес найти такое распределение ядерного горючего по объему активной зоны реактора, при котором функционал (1) минимален.

Для качественного исследования решения задачи рассмотрим ее простейшую модель. При этом ограничимся случаем, когда неравномерностью выгорания можно пренебречь. Выберем плоский симметричный реактор с активной зоной полуширины R и отражателем толщиной Δ . Предположим, что конструкционные материалы (в том числе замедлитель) распределены однородно по объему реактора и их свойства неизменны как в активной зоне ($0 \leq r \leq R$), так и в отражателе ($R \leq r \leq R + \Delta$). Если считать резонансное поглощение и захват нейтронов при замедлении несущественными, тогда систему уравнений для потоков тепловых $\Phi(r)$ и быстрых $\varphi(r)$ нейтронов в активной зоне в двухгрупповом диффузионном приближении можно записать в виде

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{1+u}{L_0^2} \Phi + \frac{D}{\tau} \varphi \right) = 0, \quad \frac{d}{dr} \left(\varphi - \frac{1}{\tau} \Phi + \frac{\eta u}{DL_0^2} \Phi \right) = 0, \quad (2)$$

где $D = D_6/D_T$ — отношение коэффициентов диффузии быстрой и тепловой группы; L_0 — длина диффузии без учета поглощения в уране; τ , η — квадрат длины замедления и эффективное число рождающихся быстрых нейтронов на один акт захвата в уране соответственно. Уравнения для потоков нейтронов в отражателе можно получить из системы (2), если принять в ней $u \equiv 0$

и заменить L_0 , τ и D на константы отражателя L_* , τ_* и D_* .

Функция $u(r)$ — отношение макроскопических сечений поглощения урана и конструкционных материалов — пропорциональна концентрации урана, которая заранее не известна. При этом на нее наложены технологическое и теплотехническое ограничения:

$$0 \leq u(r) \leq U_{\max}; \quad \Phi(r) u(r) \leq q_{\max}. \quad (3)$$

Требуется определить функцию $u(r)$ таким образом, чтобы функционал (1) был минимальным.

Сформулированная задача как неклассическая задача вариационного исчисления была исследована с помощью принципа максимума Л. С. Понтрягина [2] и методом множителей Лагранжа [3], причем в первом случае ее удобно было свести к задаче о минимуме мощности реактора при заданном максимальном потоке в отражателе, а во втором — к задаче о максимуме потока нейтронов в отражателе при заданной мощности реактора. В силу линейности уравнений (2) и линейной зависимости их коэффициентов от функции управления нетрудно показать [4, 5], что в качестве допустимых значений функции $u(r)$ могут быть только границы ее области изменения. Таким образом, активная зона реактора, оптимального в рассматриваемом смысле, может состоять из участков трех и только трех типов: $u(r) = U_{\max}$; $u(r) = q_{\max}/\Phi(r)$; $u(r) = 0$. При этом оптимальная компоновка из этих участков активной зоны, очевидно, зависит или от заданного максимального потока нейтронов в отражателе при первом подходе, или от заданной мощности — при втором. Если исключить из рассмотрения компоновки активной зоны с участками $u(r) = 0$, т. е. искать решение в классе непрерывных функций, то можно проследить зависимость подозрительных на оптимальность компоновок от заданной мощности (или максимального потока нейтронов в отражателе).

На малых мощностях P теплотехническое ограничение будет выполняться всюду в $[0, R]$, и оптимальной

может быть только компоновка с $u(r) = U_{\max}$ всюду в $[0, R]$. С ростом мощности будет расти и $\Phi(r)$, так что при некоторой мощности P_1 (в случае исследованных реакторов для определенности будем считать, что $L_1 < L_*$ и $\tau_* \ll L_*^2$) окажется $\Phi(R) = q_{\max}/U_{\max}$. При $P > P_1$ и $u(r) = U_{\max}$ у границы с отражателем возникнет бы участок с $\Phi(r) > q_{\max}/U_{\max}$, на котором нарушается теплотехническое ограничение. Поэтому при $P > P_1$ оптимальным должно быть распределение с $u(r) = U_{\max}$ в центре реактора и с $u(r) = q_{\max}/\Phi(r)$ у границы с отражателем. С дальнейшим увеличением мощности при $P = P_2 > P_1$ окажется $\Phi(0) = q_{\max}/U_{\max}$, и для $P_1 > P_2$ оптимальной будет компоновка с участками $u(r) = q_{\max}/\Phi(r)$ в центре и на краю и участком $u(r) = U_{\max}$ между ними. Наконец, при мощности $P = P_3 > P_2$ участок с $u(r) = U_{\max}$ стягивается в точку, и при $P \geq P_3$ оптимальной будет компоновка с $u(r) = q_{\max}/\Phi(r)$ всюду в активной зоне.

Численными расчетами* было подтверждено, что в указанных случаях выполняется необходимое условие оптимальности рассматриваемой системы. Расчеты проводились при $\eta = 2,3$; $L_0 = 169 \text{ см}^2$; $L_*^2 = 10^4 \text{ см}^2$; $\tau = \tau_* = 144 \text{ см}^2$; $\Delta = 200 \text{ см}$ и одинаковых коэффициентах диффузии активной зоны и отражателя, причем $\Phi(r)$ нормировано так, что $q_{\max} = 1$.

Приведем в качестве иллюстрации характер изменения $\Phi(r)$ и $u(r)$ для случая, когда $P \geq P_3$ и $R = 55 \text{ см}$ (см. таблицу). Тогда максимальный поток тепловых нейтронов $\Phi(r) \approx 1,84$, а положение максимум потока нейтронов соответствует $r_{\max} \approx 71 \text{ см}$. При $P > P_3$, как и следовало ожидать, с ростом r поток нейтронов $\Phi(r_{\max})$ растет слабо, расстояние $r_{\max} - R$ сокращается незначительно. Так, при изменении R в диапазоне 55—75 см $\Phi(r_{\max})$ и $r_{\max} - R$ меняются только в четвертом знаке.

* Расчеты были выполнены В. П. Глушаковым.

Поведение $\Phi(r)$ и $u(r)$

$r, \text{ см}$	0	10	20	30	40	50	55
$\Phi(r)$	1,25	1,24	1,22	1,21	1,17	1,29	1,49
$u(r)$	0,80	0,81	0,82	0,83	0,86	0,78	0,67

Таким образом, для каждого реактора с известными константами активной зоны и отражателя и с заданными величинами U_{\max} и q_{\max} имеются три характерных параметра: значения мощности P_1, P_2 и P_3 [или потока нейтронов $\Phi(r_{\max})$], являющиеся границами существования указанных выше компоновок. Каждому значению мощности P соответствует своя оптимальная компоновка. Среди таких компоновок и следует отыскивать ту, которая минимизирует функционал (1). Минимум последнего может быть определен после задания конкретного значения UG .

Поступило в Редакцию 15/VI 1971 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Ерыкалов, Ю. В. Петров. «Атомная энергия», 25, 52 (1968).
2. Л. С. Ионтрягин и др. Математическая теория оптимальных процессов. М., Физматгиз, 1959.
3. В. А. Троицкий. «Прикладная математика и механика», 26, 29 (1962).
4. Т. С. Зарипкая, А. П. Рудик. «Атомная энергия», 22, 6 (1967).
5. Э. Г. Сахновский. «Атомная энергия», 29, 201 (1970).

Использование твердых трековых детекторов в реакторных экспериментах

В. А. КУЗНЕЦОВ, А. И. МОГИЛЬНЕР, В. П. КОРОЛЕВА, В. С. САМОВАРОВ, Л. А. ЧЕРНОВ

УДК 539.1.074.88

В последние годы для регистрации осколков деления и заряженных частиц в ядерной физике и физике реакторов все чаще находят применение твердые трековые детекторы [1—3]. Высокая чувствительность и эффективность регистрации, малые размеры и малое вносимое возмущение — эти преимущества трековых детекторов особенно ценны при измерениях на критических сборках с тесными решетками и малыми нейтронными потоками. Цель данной работы — разработка методики регистрации нитроцеллюлозой α -частиц из реакций $B^{10}(n, \alpha) Li^7$, $Li^6(n, \alpha) T$ и осколков деления U^{235} с помощью слюды, выбор подходящих материалов для регистрации, исследование их характеристик и режимов травления, а также применение методики в экспериментах на реакторе.

Нитроцеллюлоза. Для регистрации α -частиц B^{10} и Li^6 использовали киноплёнки марок А-2 и ВЧ и рентгеновские пленки РФ-3, РФ-5 на основе нитрата целлюлозы. При травлении в качестве химического раство-

рителя использовали водные растворы едких натрия или кали. Треки α -частиц размером 20—30 мк после травления рассматривали в микроскопе типа МИМ-7 при увеличении 130. На рис. 1—5 представлены фотографии треков α -частиц слоя B^{10} , а также зависимости размеров треков от времени травления (для двух растворителей), от температуры, концентрации растворителя и энергии α -частиц. Для нитроцеллюлозы можно рекомендовать следующие режимы травления: растворитель NaOH, его концентрация 30%, $t^0 = 60^\circ C$, $T_{\text{трав}} = 15 \text{ мин}$.

Слюда. Осколки деления регистрировались слюдой. Перед облучением слюду протравливали, чтобы отделить фоновые треки в ней от треков деления в реакторе по размерам.

На рис. 6 показана фотография треков осколков деления слоя U^{235} наряду с фоновыми треками (крупные ромбы). Для травления слюды использовали 40%-ный HF ($t = 60^\circ C$, $T_{\text{трав}} = 30 \text{ мин}$).