



Р и с. 4. Изменение термо-э. д. с. облученных образцов константана (○) и копель (▲) при изохронном отжиге:

○ — доза облучения $1,8 \cdot 10^{20}$ нейтр/см²;
▲ — $0,35 \cdot 10^{20}$ нейтр/см².

Характер возврата термоэлектрических свойств при изохронных отжигах материалов на никелевой (алюмель, хромель, нихром) и медно-никелевой (константан, копель) основе свидетельствует о протекающих сложных процессах (рис. 3 и 4). Так, у всех материалов после отжига даже меняется знак термо-э.д.с. (по сравнению с необлученными образцами-свидетелями) и в ряде случаев на кривых обнаруживаются максимумы или минимумы. Ступенчатый отжиг до 700° С

(температура отжига перед облучением) приводил практически к более или менее полному восстановлению свойств указанных материалов.

Полученные результаты дают возможность оценить поведение обычных термопар при нейтронном облучении. Облученные термопары медь — константан, медь — копель, железо — константан, хромель — копель, хромель — алюмель и нихром — константан будут развивать меньшую термо-э.д.с. по сравнению с необлученными. Наибольшие изменения (уменьшение на 1—1,5%) следует ожидать при дозах порядка 10^{20} нейтр/см² для термопар медь — копель, медь — константан, а также хромель — алюмель.

При облучении дозами быстрых и тепловых нейтронов 10^{19} — 10^{20} нейтр/см² изменение термоэлектрических свойств платины и золота (при сопоставимых дозах облучения) было меньше, чем для их сплавов. Следовательно, и в этом случае термо-э. д.с. для термопар золото — сплав золота с палладием и платинородий — платина, вероятно, уменьшится на 1—2%.

Отжиг в интервале 100—700° С большинства облученных обычных термопарных материалов (константан, копель, хромель, алюмель, нихром) приводит к восстановлению в большей или меньшей степени величины их термо-э.д.с. Поэтому можно предполагать, что в случае использования указанных термопар в условиях реакторного облучения при относительно более высоких температурах погрешность их показаний окажется не выше полученной путем оценки на основании изменений термоэлектрических свойств после реакторного облучения примерно при 100° С.

Поступило в Редакцию 21/VIII 1967 г.
В окончательной редакции 24/IV 1968 г.

О взаимосвязи радиационно-химических и теплофизических параметров хемоядерного реактора

Р. С. ДЕМЕШЕВ, А. М. СИДОРОВ, Ю. И. ТОКАРЕВ

УДК 621.039.55

В последние годы большое внимание уделяется применению излучений ядерного реактора для проведения радиационно-химических процессов (РХП). Наибольший интерес представляет использование для этой цели осколков деления, поскольку их кинетическая энергия составляет ~84% всей энергии, выделяющейся при делении ядра. В работах [1, 2] показано, что использование осколков деления наиболее перспективно для синтеза энергоемких химических соединений, например двуокиси азота из кислорода и азота, гидразина из аммиака, этиленгликоля из метанола и т. п.

Реактор, в котором кинетическая энергия осколков деления используется для проведения радиационно-химического процесса, принято называть хемоядерным. Тепловыделяющие элементы такого реактора (обычно их называют хемоядерными элементами — хэлами) должны обеспечивать выход возможно большего количества осколков деления в химический реагент и поэтому должны иметь возможно большую удельную поверхность. Эффективность хемоядерного топлива характеризуется величиной ϵ — долей энергии осколков деления, выносимой в реакционную среду. В качестве возможных хэлов предлагаются фольги из сплава урана с различными металлами, урансодержащее стекловолокно, пылевидное топливо, фольги с нанесенным на их поверхность слоем урана и др. [2]. Для таких

хэлов характерна малая толщина топливного слоя (порядка 10 мк), соизмеримая с пробегом осколков деления в твердом веществе. Реакционная смесь (химический реагент) может являться и теплоносителем хемоядерного реактора, отводящим все тепло, выделяющееся в реакторе, или основную часть тепла. В связи с необходимостью поддержания оптимальной температуры РХП подогрев реагента в некоторых случаях должен быть минимальным, что может быть достигнуто, в частности, увеличением расхода (и, следовательно, скорости) реагента. Однако сочетание большой удельной поверхности хэлов с высокой скоростью реагента приводит к значительному увеличению гидравлического сопротивления активной зоны хемоядерного реактора. Может оказаться, что при некоторых значениях энерговыделения в активной зоне для отвода тепла необходимо пропускать реагент через активную зону с такой скоростью, при которой потери давления по ее высоте станут неприемлемыми. Один из возможных путей снижения потерь давления реагента — уменьшение удельной мощности реактора до величины, при которой обеспечивается отвод тепла с приемлемой скоростью реагента. Однако уменьшение удельной мощности имеет границы, определяемые допустимым увеличением размеров активной зоны с конструктивной точки зрения, возможностью создания критичной

системы, радиационно-химическими параметрами процесса (временем облучения и требуемой для проведения данного процесса поглощенной дозой излучения, получаемой химическим реагентом в виде энергии осколков деления). Последний параметр является особенно важным, поскольку необходимо точно знать, какие дозы излучения может получить химический реагент в каждом конкретном типе хемоядерного реактора, от чего они зависят и с чем связаны.

В данной работе получена связь параметров РХП (поглощенной дозы и времени облучения) с характеристиками хэлов (удельной поверхностью и эффективностью) и интенсивностью теплообмена в активной зоне.

Общая мощность излучения осколков деления, выделяющаяся в реагенте, при мощности реактора N (Мвт) определяется выражением

$$E_i = nE_i N \epsilon = 3,1 \cdot 10^{16} \cdot 1,65 \cdot 10^8 \epsilon N = 5,12 \cdot 10^{24} \cdot \epsilon N \text{ эв/сек}, \quad (1)$$

где n — число делений в 1 сек при мощности 1 Мвт; E_i — энергия осколков при одном делении, равная $1,65 \cdot 10^8$ эв.

Для осуществления необходимой глубины превращений РХП реагент должен получить определенную дозу D (эв/см³). Следовательно, при заданной мощности реактора расход реагента должен быть равен

$$V = \frac{E_i}{D} = 1,84 \cdot 10^{22} \frac{\epsilon N}{D} \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (2)$$

С другой стороны, реагент должен отводить все тепло Q (или некоторую его долю β), выделяющееся в активной зоне, поэтому его расход должен удовлетворять соотношению

$$V = \frac{Q}{\gamma c_p \Delta t_p}, \quad (3)$$

где c_p — средняя теплоемкость реагента; Δt_p — средний подогрев реагента по высоте активной зоны; γ — усредненная плотность реагента. Отсюда определяется величина поглощенной дозы для химического реагента в активной зоне хемоядерного реактора:

$$D = 2,14 \cdot 10^{16} \frac{c_p \gamma \Delta t_p \epsilon}{\beta} \text{ эв/см}^3. \quad (4)$$

Таким образом, выражение (4) связывает теплофизические свойства реагента-теплоносителя (c_p и γ) с параметрами реактора (подогревом реагента Δt_p и эффективностью топлива ϵ). Если объем в активной зоне, занимаемой хэлами и реагентом, равен W (м³), а доля реагента в этом объеме f , то время облучения реагента

$$\tau = \frac{W}{V} f \text{ сек}. \quad (5)$$

Подставляя значение объемного расхода V из (2) в (5) и заменяя N/W на ω — энергонапряженность реактора (квт/л), для однородной активной зоны получаем

$$\tau = 1,98 \cdot 10^{-19} D f / \epsilon \omega \text{ сек} \quad (6)$$

или выражение для дозы

$$D = 5,12 \cdot 10^{18} \tau \epsilon \omega / f \text{ эв/см}^3. \quad (7)$$

Теперь сравнительно просто перейти к связи дозы с интенсивностью теплообмена в активной зоне. Если хэлы имеют удельную поверхность σ (м²/л), то для заданной энергонапряженности активной зоны тепловой поток

$$q = \frac{\omega (1 - \epsilon)}{\sigma} 860 \text{ ккал/м}^2\text{ч}, \quad (8)$$

где произведение $\omega (1 - \epsilon)$ характеризует долю энергии осколков деления, выделяющейся непосредственно в хэлах. С другой стороны, тепловой поток можно выразить через коэффициент теплоотдачи α :

$$q = \alpha \Delta t_{ст} \text{ ккал/м}^2\text{ч}, \quad (9)$$

где $\Delta t_{ст}$ — температурный напор между поверхностью хэла и реагентом-теплоносителем. Комбинируя формулы (8) и (9), получаем значение энергонапряженности

$$\omega = \frac{\alpha \sigma \Delta t_{ст}}{(1 - \epsilon) 860} \text{ квт/л}. \quad (10)$$

Подставляя формулу (10) в выражение (7), находим значение поглощенной дозы

$$D = 5,94 \cdot 10^{15} \frac{\epsilon \alpha \sigma \tau \Delta t_{ст}}{(1 - \epsilon) f} \text{ эв/см}^3. \quad (11)$$

Из формулы видно, от чего зависит поглощенная доза излучения энергии осколков деления в хемоядерном реакторе. В нее входят три группы величин: величины, характеризующие интенсивность теплообмена в активной зоне (α и Δt), величины, характеризующие хемоядерное топливо (ϵ , σ , f), и параметр радиационно-химической реакции — время облучения реагента в активной зоне τ (сек).

Приведенные выражения для поглощенной дозы позволяют судить о целесообразности того или иного типа реактора для проведения определенного радиационно-химического процесса. Эти выражения могут быть использованы также при исследованиях в области радиационной химии для нахождения предельных величин доз.

В заключение можно рекомендовать следующие методы увеличения поглощенной дозы: 1) применение дополнительного теплоносителя, который отводит значительную часть тепла, 2) разделение потока реагента в активной зоне на две части большая из которых служит для отвода тепла, 3) отвод тепла кипящим реагентом.

Поступило в Редакцию 26/IX 1967 г.
В окончательной редакции 28/III 1968 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. Даусон, Г. Лонг. Химия в ядерной энергетике. М., Госатомиздат, 1962.
2. Б. Мановиц и др. Доклад № 292, представленный СССР на Третью международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1964).