

КИНЕТИКА ПЛАЗМЫ ГЕКСАФТОРИДА УРАНА

С.К. Кунаков

Алматинский технологический университет, г. Алматы

В данной работе представлена кинетическая модель плазмы UF_6 , образуемой в активной зоне ядерного реактора, и проведен численный расчет ионного состава плазмы.

Введение

Плазма UF_6 , образованной в активной зоне ядерного реактора, обладает рядом специфических особенностей, вызванных принципиально открытой структурой таких установок по носителям высоких энергий. Это вызывает ряд экспериментальных проблем. Возникает необходимость дистанционного управления процессами; невозможность повторного использования всех экспериментальных устройств и регистрирующей аппаратуры. Экспериментальные сложности связаны и с наличием: наведенной радиоактивности, необратимых структурных изменений в материалах, токсичности и химической агрессивности исходных материалов. До настоящей работы многие методические вопросы также оставались открытыми и не были исследованными и это касается зондовой диагностики (теоретическая интерпретация зондовых характеристик для слабо ионизированной плазмы содержащей отрицательные ионы).

Исследования кинетики плазмы гексафторида урана высокого давления, образованной продуктами ядерных реакций являются большей и необходимой частью комплексной программы по прямому эффективному преобразованию ядерной энергии в другие виды, а диагностика плазмы UF_6 являлась задачей требующей кропотливых и тщательных экспериментальных и теоретических исследований кинетики элементарных процессов.

Для интерпретации ВАХ необходимо оценить ионный состав плазмы. В рассматриваемой кинетической модели были учтены следующие элементарные процессы. Осколки деления, которые образуются при взаимодействии тепловых нейтронов с ^{235}U , характеризуются начальными энергиями, лежащими в диапазоне 50-115 МэВ, начальными зарядами от 16 до 24 e и массами от 70 до 160 а.е.м. Под действием высокоэнергетичных осколков деления урана в газе образуется каскад быстрых электронов. Эти электроны и осколки деления производят ионизацию молекул [1]:



Скорости процессов ионизации и возбуждения, отнесенные к единице объема, оценивались по формуле [2].

$$S_i = \Phi q_{\text{дел}} EN / U_i, \quad (6)$$

где Φ - поток тепловых нейтронов, $q_{\text{дел}}$ - сечение ядерной реакции, E - энергия деления, N - концентрация делящегося вещества, U_i - энергетическая цена образования соответствующего продукта в данной реакции.

Кинетика

Потенциал ионизации гексафторида урана $I.P(UF_6) = 13.86$ эв. Сечение ионизации гексафторида урана в диапазоне от потенциала ионизации до 100 эв меняется примерно линейно от нуля до 20 \AA^2 . Сечение прилипания электронов к гексафториду урана имеют два максимума в области 2,15 эв, второй в области 7 эв. Сечение в первой точке равно $(2,7 \pm 1) \text{ \AA}^2$. Пик концентрации UF_5^- также находится в области 2,7 эв. Средство электрона к UF_6 равно $(5,2 \pm 0,5)$ эв. Значение энергии связи

$$D(UF_5 - F^-) = 108 \pm 6 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}} \quad (7)$$

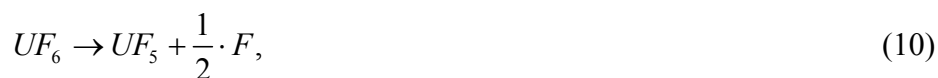
Образование UF_5^- происходит в соответствии с реакцией



Процесс же прилипания электрона, приводящий к образованию UF_6^- характеризуется довольно низкой скоростью [1]. Принято считать, что к возникновению UF_6^- приводит реакция перезарядки [1].



При этом наиболее значительное разрушительное действие производят осколки деления. Молекулы UF_6 под действием радиоактивного излучения реактора будут разрушаться на низшие фториды и фтор. В предположении, что диссоциация молекул UF_6 идет по каналу



в работах [2] определена скорость разрушения UF_6 на единицу мощности. В пределах ошибки измерения скорость радиолиза молекул UF_6 не зависит от давления и мощности дозы и составляет величину 0.28 моль/кВт.ч поглощенной энергии или (0.8 ± 0.1) молекул/100 эВ. Вместе с тем известно, что фториды сравнительно легко фторируются с повышением температуры до гексафторида газообразным фтором:



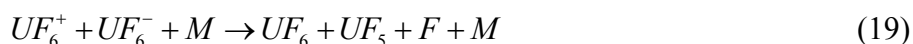
где М - третья частица.

Следовательно, при длительном облучении гексафторида урана (100 - 104 ч) устанавливается стационарное состояние. Значения концентраций UF_6 и продуктов его радиолиза в стационарном состоянии определяются мощностью дозы, начальным давлением и температурой.

Выше перечисленные положительные и отрицательные ионы, электроны и продукты диссоциации интенсивно взаимодействуют друг с другом.

Константы плазмохимических реакций для UF_6 являются оценочными и взяты из работ [1].





Численные расчеты и результаты эксперимента

Система уравнений описанной математической модели решалась численно. Для согласования с экспериментальными условиями по исследованию плазмы зондовым методом в представленных расчетах давление UF_6 принято равным 20 Торр, поток тепловых нейтронов меняется от $3 \cdot 10^{11}$ до $1,5 \cdot 10^{13}$ нейтрон $см^{-2}с^{-1}$.

Решение задачи о нахождении основных характеристик неравновесной ядерно - возбуждаемой плазмы естественно начинать с анализа распределений продуктов ядерных реакций и образуемых ими электронов по энергиям.

Количественное определение доли рекомбинационного потока идущего на уровне с $n=3$, требует решения системы нелинейных дифференциальных уравнений вида:

$$\frac{dN_m}{dt} = \sum_m k_{mm'} N_m + \delta'_m \quad (21)$$

с учетом ФРЭЭ. Здесь зависящие от переменных и параметров модели коэффициенты $k_{mm'}$ характеризует скорости столкновительных и радиационных превращений $m \rightarrow m'$, члены δ'_m - представляют собой потоки в состоянии m , обусловленные наличием положительных источников.

Поскольку плотность рассматриваемой плазмы достаточно высока, система уравнений для населенностей возбужденных уровней гелия была дополнена процессами тушения в реакциях ассоциативной ионизации, а также передаче возбуждения между уровнями с одинаковым главным квантовым числом. Система уравнений (1-18), дополненная уравнением сохранения заряда

$$UF_6^- + UF_5^- + F^- + n_e = UF_6^+ \quad (22)$$

решалась численным методом Гира для жестких систем [4].

Далее, в виду того, что зондовые измерения проводились в течении 2-3 часов, полагаем, что в рассматриваемых условиях концентрация гексафторида урана UF_6 в формуле (3) равна исходному содержанию.

В таблице 1 представлены результаты расчетов для условий проводимых экспериментов по зондовой диагностике UF_6

Таблица 1 Концентрация компонент плазмы гексафторида урана, $см^{-3}$

n_e	UF_6^+	UF_6^-	UF_5^-	F^-	F	F_2	UF_5	UF_4
$5,9 \cdot 10^6$	$2,6 \cdot 10^{11}$	$2,6 \cdot 10^{11}$	$2,1 \cdot 10^6$	$4,2 \cdot 10^4$	$7,7 \cdot 10^{13}$	$7,7 \cdot 10^{16}$	$3,9 \cdot 10^{14}$	$4,0 \cdot 10^4$

Как следует из таблицы, основным отрицательным ионом в данной смеси является ион UF_6^- . Его концентрация равна концентрации UF_6^+ (с точностью до пятого знака). Содержание UF_6^+ определяется ионизацией и гибелью в реакциях рекомбинации с UF_6^- . Концентрация электронов невелика. Результаты расчетов показывают, что отношение концентрации электронов к суммарной концентрации отрицательных ионов составляет величину порядка 10^{-4} . Из расчета следует также, что концентрация электронов определяется ионизацией и прилипанием к молекулам UF_6 .

Данные численного счета о том, что концентрация отрицательных ионов на много больше концентрации электронов, соответствует выводам, сделанным из анализа ВАХ. Далее, концентрация n – пропорциональна корню квадратному плотности потока тепловых нейтронов, т.е. $\propto \sqrt{\Phi}$, концентрация электронов пропорциональна потоку, т.е. $\propto \Phi$. Следовательно, с ростом Φ , n_e растет быстрее, чем n_∞^- и σ_∞^g становится сравнимой с σ_∞^- .

На рисунке 2 представлены расчетные и экспериментальные значения концентраций положительных ионов UF_6^+ , вычисленные из ВАХ по методикам [2]. Экспериментальные и расчетные значения концентраций UF_6^+ находятся в удовлетворительном согласии. Ввиду того, что при малых уровнях мощности реактора (100, 500 кВт) $n \cdot \mu \approx n_e \cdot \mu_e$.

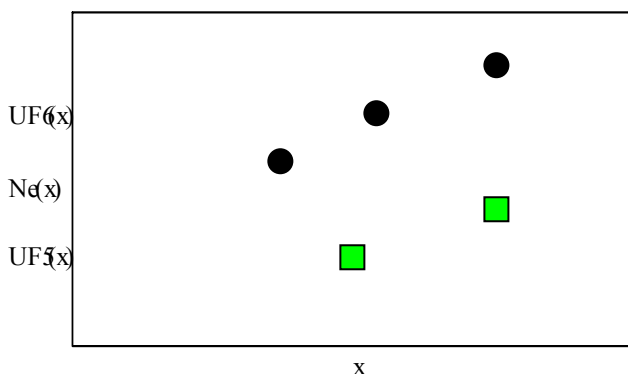


Рис.2. Зависимость концентрации заряженных частиц от плотности потока тепловых нейтронов (— расчет; эксперимент; 1- UF_6^+ ; 2 - Ne ; 3 - UF_6^-)

Выводы

Разработана кинетическая модель плазмы UF_6 и проведен численный расчет ионного состава плазмы. Из результатов расчетов следует, что основными положительными ионами являются ионы UF_6^+ отрицательными UF_6^- отношение концентрации электронов к суммарной концентрации отрицательных ионов составляет величину порядка 10^{-4} для уравнений мощности 100 и 500 кВт, т.е. Концентрация не определяется скоростями ионизации и прилипания к молекулам UF_6 . Концентрация UF_6^+ и UF_6^- пропорциональна $\propto \sqrt{\Phi}$, электронов $-\propto \Phi$. Концентрация положительных ионов, определенная из экспериментальных зондовых характеристик удовлетворительно согласуется с расчетом.

Интерпретация ВАХ различными методами позволила впервые определить коэффициенты диффузии (подвижности) ионов в плазме гексафторида урана, образованной в центре активной зоны реактора.

Литература

1. R.N.Compton, On formation of positive and negative ions in gaseous UF_6 , The Journal of Chemical Physics, Vol.66, Number 10, pp4478-4486.
2. Davis R.N., Davis J.F., Sohneider R.T. Nuclear pumping lasers, induced by pulsed reactors// Trans. Amer. Nucl.Soc.-1976.-Vol. 23.-P.520-523.
3. Дмитриевский В.А., Е.М.Воинов, Тетельбаум С.Д. Применение гексафторида урана в ядерных энергетических установках //Атомная энергия.-1970.-Т.29, №4.- С.45-52.
4. R. Bektursunova, S. Kunakov Singular Perturbation Model of Electric Probe in Slightly Ionised Plasmas with Negative Ions // Plasma Physics Reports 25.-1999.-21с.
5. Р. Бектурсунова, С. Кунаков Методы сингулярных возмущений в слабо ионизованной плазме с отрицательными ионами // Физика Плазмы, 1999.- Т.25, №10.-С.1-5.
6. Thom K. and Schneider R.T. Measurements methods for fission fragment generated plasmas// Nuclear Pumped Gas. Lasers, AIAA Journal,-1972.-Vol.10.-P.400-406.

ГЕКСАФТОРИД УРАН ПЛАЗМАСЫНЫҢ КИНЕТИКАСЫ

С.К. Қонаков

Бұл жұмыста ядролық реактордың белсенді аумағында пайда болатын UF_6 плазмасының кинетикалық моделі ұсынған және плазманың иондық құрылымын сандық зерттеуі жүргізілген.

KINETICS OF HEXAFLUORIDE URANIUM

S.K. Kunakov

In the paper the kinetic model of the plasma UF_6 formed in an active zone of a nuclear reactor is submitted, and numerical calculation of ionic structure of plasma is lead.