

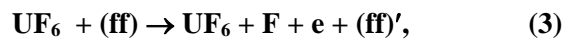
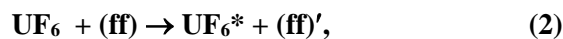
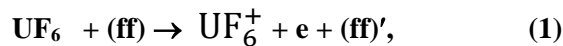
Кинетика плазмы гексафторида урана
С.К. Кунаков, Тулемисова Г.Е. Республика Казахстан

Плазма UF₆, образованная в активной зоне ядерного реактора, обладает рядом специфических особенностей, вызванных принципиально открытой структурой таких установок по носителям высоких энергий. В связи с этим возникает ряд экспериментальных проблем. Управление процессами необходимо проводить дистанционно, нет возможности повторного использования всех экспериментальных устройств и регистрирующей аппаратуры. Экспериментальные сложности связаны с наличием наведенной радиоактивности, необратимыми структурными изменениями в материалах, токсичностью и химической агрессивностью исходных материалов. До проведения настоящей работы многие методические вопросы, относящиеся к зондовой диагностике (теоретическая интерпретация зондовых характеристик для слабо ионизированной плазмы, содержащей отрицательные ионы) до последнего времени не были исследованы и соответственно не находились в разработке.

Исследование 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 UF₆ является задачей, требующей кропотливых и тщательных экспериментальных и теоретических исследований кинетики элементарных процессов.

Введение

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 ²³⁵U, 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 воздействием высоко энергетичных осколков деление урана в газе образует 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].

$$S_i = \Phi q_{\text{дел}} EN/U_i \quad (5)$$

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.

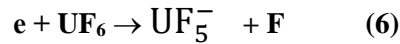
Кинетика

Потенциал ионизации гексафторида урана $I.P(\text{UF}_6) = 13.86 \text{ эВ}$. Сечение ионизации гексафторида урана в диапазоне от потенциала ионизации до **100 эВ** меняется примерно линейно от нуля до **20 Å²**. Сечение прилипания электронов к гексафториду урана имеют два максимума:

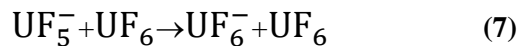
области 2.15 эв , второй в области 7 эв . Сечение в первой точке равно $(2.7 \pm 1) \text{ \AA}^2$. Пик концентрации UF_5^- также находится в области 2.7 эв . Сродство электрона к UF_6 равно. Значение энергии связи

$$D(\text{UF}_5 - \text{F}^-) = 108 \pm 6 \frac{\text{kcal}}{\text{mol}}$$

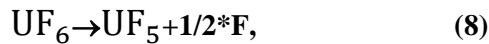
Образование UF_5^- происходит в соответствии с реакцией



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 $(0.8 \pm 0.1) \text{ молекул/100 эв}$. Вместе с тем известно, что фториды сравнительно легко фторируются с повышением температуры до гексафторида газообразным фтором:

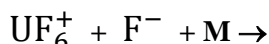
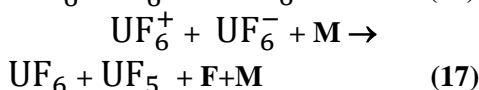
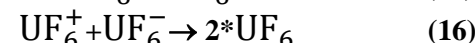
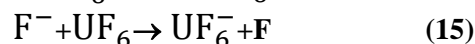
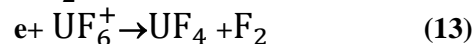


где M - третья частица.

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].



$$UF_6 + F + M \quad (18)$$

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:

$$(19)$$

с учетом ФРЭЭ. Здесь зависящие от переменных и параметров модели коэффициенты $k_{mm'}$ характеризует скорости сталкивающихся 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

$$UF_6^- + UF_5^- + F^- + n_e = UF_6^+ \quad (20)$$

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
Форма таблицы не доработана.

n_e	UF_6^+	UF_6^-	UF_5^-	F^-
$5.9 \cdot 10^6$	$2.6 \cdot 10^{11}$	$2.6 \cdot 10^{11}$	$2.1 \cdot 10^6$	$4.2 \cdot 10^4$
F	F₂	UF₅	UF₄	
$7.7 \cdot 10^{13}$	$7.7 \cdot 10^{16}$	$3.9 \cdot 10^{14}$	$4.0 \cdot 10^4$	

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

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

ну порядка 10^{-4} . Из расчета следует также, что концентрация электронов определяется ионизацией и прилипанием к молекулам UF_6 .

Данные числового подсчета показывают, что концентрация отрицательных ионов намного больше концентрации электронов и соответствует выводам, сделанным из анализа ВАХ. Далее, концентрация n_- пропорциональна корню квадратному плотности потока тепловых нейтронов, т.е. $\sim \sqrt{\Phi}$, концентрация электронов пропорциональна потоку, т.е. $\sim \Phi$. Следовательно, с ростом Φ , n_e растет быстрее, чем n_{∞}^- и σ_{∞}^e становится сравнимой с σ_{∞}^- .

На рисунке 1 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) $n_{\mu} \gg n_{\infty}$.

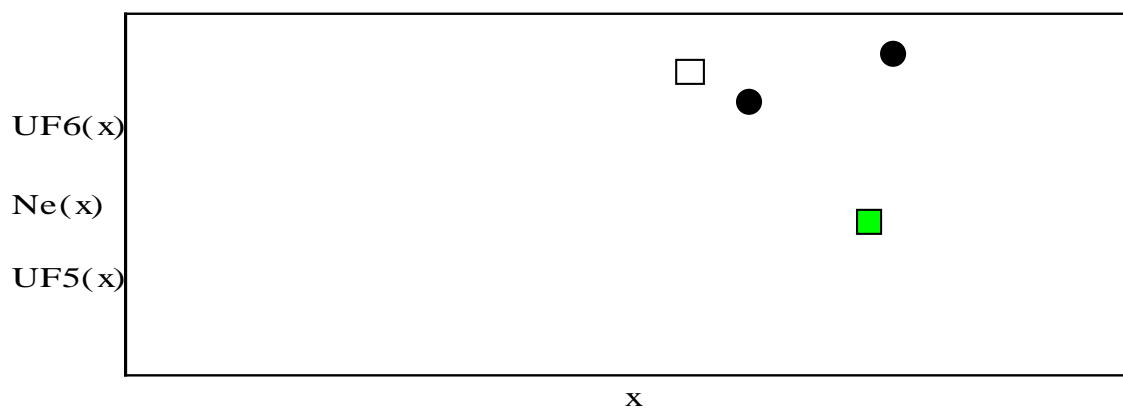


Рис.1. Зависимость концентрации заряженных частиц от плотности потока тепловых нейтронов (1 - UF_6^+ ; 2 - Ne; 3 - UF_5^-)

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 Ne определяется скоростями ионизации и прилипания к молекулам UF_6 . Концентрация UF_6^+ и UF_6^- пропорциональна $\sim \sqrt{\Phi}$, электронов - $\sim \Phi$. 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.

УДК 533.9.01

Кинетика плазмы гексафторида урана

**С.К. Кунаков,
Тулемисова Г.Е.**
*Республика Казахстан,
sandybeck@kunakov.kz, 2909981
faridat@atso.kz,*

ГЕКСАФТОРИД УРАНАНЫҢ КИНЕТИКАСЫ ҚАСИЕТТЕРГЕ ТОЗАҢДЫҚ КОМПОНЕНТТІНІҢ САЛЫМЫ

**С.К. Кунаков,
Тулемисова Г.Е.**

Гексафторид уранның кинетикасы және экспериментын салымы қасиеттерге тозаңдық компонентінің салымы бұрын ұсынылған реакцияларның негізінде зерттелген. Жүйеде алыстық ретінің қалыптасуы байқалған және оның сипаттау шамасы анықталған. Сонымен қатар кинетикалық реакцияның концентрация мен энергия және теңдеудің күйіне беретін салымы есептелген.

KINETICS OF HEXAFLUORIDE URANIUM

**S.K. Kunakov,
Tulemissova G.E.**

The kinetic investigation of high pressure gaseous hexafluoride uranium induced by nuclear fragments is the essential part of the complex program directed to the solution of effective direct energy transformation of nuclear energy in to others. The kinetic of UF_6 plasma, created in the active zone of the stationary nuclear reactor, has some specific features. In the list of these features in particular ones are undivided and might be enumerated as follows : unavailability of first hand contact with the experimental set, necessity of the distant manipulation to manage the experimental set be the reason of the induced radiation, which makes the hardware of the experimental set the one use set, irreversible structural changes in measuring instruments diagnostic devices caused by strong radiation field, toxic properties and chemical aggression of original materials .Up to this work many methodical questions were not revealed and were not investigated and these remarks mainly should be regarded to probe diagnostic (theoretical interpretation of the probe characteristics for weakly ionized plasma, containing negative ions). Taking this arguments into the consideration the probe diagnostics is the subject of the laborious theoretical and experimental investigations of the elementary processes which impossible to be studied at once and actuality of this investigation is very vital up to nowadays.