

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ АБСОЛЮТНЫХ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПЛАЗМЫ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ, ОБРАЗОВАННЫХ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ СТАЦИОНАРНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА.

С.К. Кунаков

*Алматинский Технологический Университет,
Республика Казахстан*

Одной из главных проблем эволюции открытых систем является проблема преобразования энергии. При создании ЯЭУ (ядерно-энергетических установок), основанных на новых физических принципах, фундаментальной проблемой является проблема преобразования ядерной энергии в энергию оптического когерентного (лазерного) и некогерентного излучения и в электрическую энергию. Основным элементом таких преобразователей является неравновесная ядерно – возбуждаемая плазма различных газовых смесей, образованная продуктами ядерных реакций под действием нейтронов в ядерном реакторе. Значительные возможности в исследовании плазмы, образованной продуктами ядерных реакций, открывает использование оптических методов. Известно, что спектральный метод наиболее информативен из существующих методов исследования плазмы, он в принципе позволяет определить распределение молекул по возбужденным состояниям и кинетические процессы их определяющие.

Введение

Прогнозирование возможности создания и определение характеристик таких ядерно-энергетических установок невозможно без знания физико-химических процессов, происходящих в такой плазме, и, соответственно, состава компонентов плазмы.

В связи с этим, объектом исследования настоящей работы является плазма, образованная в активной зоне стационарного ядерного реактора, которая является уникальным объектом, где интенсивно происходят наиболее значимые физико-химические процессы, связанные с преобразованием ядерной энергии в световую, минуя тепловую стадию. Световая энергия, как известно, является более предпочтительным “исходным” энергетическим материалом для дальнейших прикладных технологических процессов самого различного земного и космического предназначения.

2.Эспериментальная установка

В соответствии с конструкцией реактора ВВР-К и спецификой эксперимента был разработан диагностический канал, позволяющий облучать исследуемые газы в центре

активной зоны реактора. Исследуемые газовые смеси находились в запаянных ампулах с окнами из радиационно-стойкого стекла С-96, которые помещались в черненые защитные кожуха из материала Д-16Т.

Процентное содержание примесей приведено в таблице 1. В опытах с галогенидами ртути использовались ксенон особой чистоты и осушенный технический азот. Давление смесей в ампулах при комнатной температуре составляло $P=0.57-0.92$ МПа. Облучение осуществлялось потоками тепловых нейтронов с плотностью $\Phi=2 \cdot 10^{12} - 1.8 \cdot 10^{13}$ тепл. нейтрон $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$. Плотность энерговыделения не превышала -1 Вт. см^{-3} .

Диагностический канал (рис.1) представляет собой две параллельно расположенные трубы 50 мм, соединенные поворотным коленом. Канал изготовлен из нержавеющей стали 12х18Н10Т. Труба 3 является световодом, ее внутренняя поверхность для устранения дополнительных отражений света покрыта газовой сажей. Загрузка и выгрузка ампул с исследуемыми смесями осуществляется по трубе 4, чем обеспечивается постоянство геометрического фактора в процессе измерений. Коническое гнездо 7 предназначено для со-

вмещения оптических осей ампулы и световода. На торце трубы световода устанавливались либо поворотное зеркало и система фокусирующей оптики, либо фотографический объектив Юпитер-36В, либо телескоп, состоящий из двух объективов Юпитер-36В и Гелиос-44 (увеличение 1:1) 9, с помощью которых изображение исследуемого источника излучения фокусировалось в плоскости входной щели монохроматора 10.

Таблица 1 – Содержание примесей в исследуемом ³He

Примеси	Результат анализа (%)
Атомарная доля гелия-3	99.8
Атомарная доля гелия-4	0.20
Объемная доля азота	0.0001
Объемная доля водорода	0.0001
Объемная доля углеводородов	0.0001

В экспериментах использовался светосильный монохроматор МДР-2 с дифракционными решетками 600 и 1200 штр/мм. Обратная линейная дисперсия $I/DI=40$ А/мм и $I/DI=20$ А/мм соответственно. Оптимальная ширина раскрытия щелей определенная опытным путем не менялась в течение измерений и оставалась равной 200 мкм при высоте входной щели 0.2 мм при работе с объективом 1 мм при работе с телескопом, которая ограничивалась условиями градуировки абсолютной спектральной чувствительности установки.

При работе реактора на мощности неизбежен фон от его излучения, поэтому в целях радиационной безопасности на крышке реактора располагалась лишь необходимая часть спектрального оборудования, управление которым осуществлялось дистанционно с пульта. Для обеспечения автоматического сканирования монохроматор был оснащен реверсивным двигателем РД-09.

Одним из критериев надежности результатов измерений является их воспроизводимость. Для этого исследовались по две ам-

пулы одинакового состава, а также два типа вышеуказанных ФЭУ с различными характеристиками относительной спектральной чувствительности. Калибровка спектральной чувствительности установки в абсолютной мере осуществлялась с помощью эталонных ламп накаливания СИРШ 8.5 - 200-1 и ТРУ - 1100-2350.

Эксперименты сводились фактически к измерению абсолютных яркостей спектральных линий, полос и величин реабсорбции, которые измерялись методом различных длин. По данным измерений вычислялись первичные (исправленные на реабсорбцию) яркости линий, полос, и концентрации возбужденных атомов и молекул.

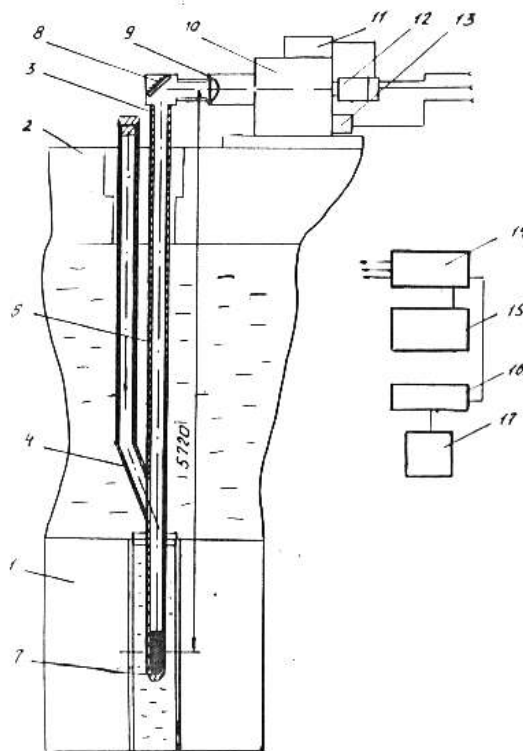


Рис.1. Схема измерения оптических характеристик плазмы на реакторе ВВР-К: 1 - активная зона реактора; 2 - крышка реактора; 3 - диагностический канал; 4 - поворотное колено; 5 - транспортная труба; 6 - труба - световод; 7 - коническое гнездо; 8 - поворотное зеркало; 9 - объектив; 10 - МДР-2; 11 - ТЭС-88; 12 - ФЭУ-79; 13 - реверсивный двигатель РД-09; 14 - пульт управления; 15 - ВС-22; 16 - анализатор; 17 - самопишущий потенциометр.

Исследования моногалогенидов ртути HgX_2 ($X=Cl, Br, J, F$) показали перспективность среды на основе $HgBr_2$ для создания ядерных источников света, что потребовало дополнительных исследований по оптимизации ее состава.

Поскольку спектры электронноколебательных переходов моногалогенидов ртути представляют собой полосы, для определения интегральных характеристик излучения (яркости молекулярных полос) производится их графическое интегрирование, что связано с большой трудоемкостью обработки спектральных данных. При считывании информации с диаграммной ленты в процессе усреднения и статистической обработки в результате измерений вносятся искажения и дополнительные погрешности.

Вышеизложенные факторы привели к необходимости создания нового диагностического канала и усовершенствованию (автоматизации) установки, описание которой приводится ниже. Схема диагностического канала показана на рисунке 4. Ампула 1 с внутренним диаметром 18 мм, длиной 600 мм и откачной патрубком диаметром 10 мм, изготовленные из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, предварительно обезгаживались в лабораторных условиях при температуре $250^{\circ}C$ и вакууме 10^{-5} Па. Затем в ампулу вносилось несколько мг соли $HgBr_2$. В реакторных экспериментах система вакуумировалась до $1 \cdot 10^{-1}$ Па, затем заполнялась исследуемой смесью. Давление контролировалось образцовыми манометрами и моновакууметром ВГД-1. Необходимое давление паров $HgBr_2$ обеспечивалось электрическим нагревом ампулы. Температура контролировалась хромель-алюмелевыми термопарами с погрешностью $\pm 3.2\%$. Излучение плазмы выводилось по трубе 3, черненной изнутри, в верхней части которой устанавливались поворотное зеркало 4. Для фокусировки изображения источника излучения в плоскости входной щели

монохроматора МДР-23 (6) использовался описанный выше телескоп. Световой поток на выходе монохроматора регистрировался ФЭУ-106. памяти АИ-1024, обрабатывались на ЭВМ

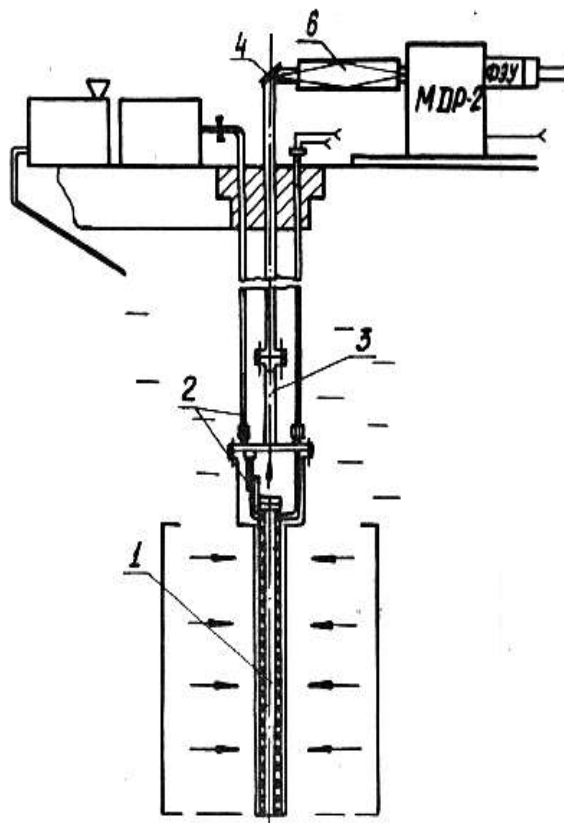


Рис.2. Схема диагностического канала с нагревателем 1-ампула, 2-вакуумный отвод, 3-световод, 4-поворотное зеркало, 6-конденсор.

Предварительно в лабораторных условиях была проведена градуировка абсолютной спектральной чувствительности установки с помощью эталонных ламп накаливания, результаты которой были программно внесены в память ЭВМ. Полезный сигнал после усиления накапливался в памяти многоканального анализатора АИ-1024.

3. Измерение абсолютных интенсивностей спектральных линий оптического излучения плазмы ${}^3He(n,p)T$

В условиях стационарного ядерного реактора ВВР-К автором данной работы совместно с Редькиным А.В., проведены абсолютные измерения спектров оптического излучения плазмы: ${}^3He(n,p)T$ в диапазоне длин волн

400-800 нм. Для этой цели создана установка, принципиальная схема которой показана на рисунке 3. Источником излучения являлась ядерно-возбуждаемая плазма ${}^3\text{He}(n,p)T$, образующаяся при облучении стеклянной ампулы заполненной ${}^3\text{He}$, с окном из радиационно-стойкого стекла С-96.

Спектральное исследование оптического излучения плазмы, образованной продуктами ядерных реакций, имеет также определенные особенности (в отличие от многих других работ по облучению материалов на реакторе); измерения должны проводиться в условиях работы реактора на мощности. Важность подобных работ (проведение измерений в процессе облучения) неоднократно подчеркивалась. Трудности, связанные с этим, заключаются в обеспечении биологической защиты при минимальных потерях светового излучения и в сложностях регистрации спектра в условиях реактора. Первая трудность разрешима с помощью выбора определенной конструкции экспериментальной установки; вторую позволяет решить фотоэлектрический метод регистрации оптического излучения, особенно при использовании техники счета фотонов.

В поле реакторного излучения многие оптические материалы уменьшают свою пропускную способность, а отражающие - увеличивают поглощательную. Поэтому очень важно обеспечить в процессе работы постоянство оптических свойств установки, а также выходного окна ампулы. Биологическая защита при выводе оптического излучения может обеспечиваться различными способами. Ее реализация основывается на различии взаимодействия с веществом жесткого реакторного излучения и "мягкого" ($h\nu \sim 0.3-3$ эВ) оптического излучения. Можно использовать свойство отражать оптическое излучение от определенных материалов (зеркальных покрытий), тогда как жесткое реакторное излучение либо поглощается в данном материале, либо проходит сквозь него. Обычно в

спектральной диагностике используют ампулы с окном из цериевого стекла [3]. Если не осуществлять спектральную обработку спектра, то регистрируемый (записываемый) спектр будет искажен по отношению к спектру излучения. Исправление спектров производится с помощью спектральной функции. Но определенную информацию о плазме можно получить и из неисправленных спектров. В частности, из регистрируемых спектров можно определить какие атомы и молекулы высвечиваются. Кроме того, исследуя зависимость интенсивности излучения от вкладываемой в газ мощности, можно проследить изменение спектра в зависимости от химического состава плазмы. Но при этом следует отметить, что при анализе регистрируемых спектров можно сопоставить результаты по одной линии, и нельзя сравнивать интенсивности различных линий. Переход к относительным спектрам (учет спектральной функции установки) дает возможность проводить сравнения интенсивностей различных линий и тем самым получать несравненно более полную информацию при измерениях спектральных распределений интенсивностей и сравнить с теоретическими расчетами. Кроме основных искажающих факторов, которые связаны с выводом оптического излучения из реактора (выходное окно ампулы, световод с зеркалом), его анализом (монокроматор), регистрацией (ФЭУ) существует ряд дополнительных.

К дополнительным искажающим факторам следует отнести:

а) необратимые изменения химического состава ампулы,

б) излучение воздуха в экспериментальном канале.

Соотношение полезный/паразитный сигнал примерно соответствует соотношению энергокладов, излучение от канала представляет собой множество молекулярных полюсов (большинство от азота) газов воздуха с довольно сильным континуумом. Хотя это

излучение мало, его нужно учитывать при измерении слабых континуумов от плазмы исследуемых смесей,

в) люминесценция стекла ампул (люминесценция стекол, активированных церием, зависит от степени окисления; люминесцируют лишь стекла, содержащие в своем составе ионы трехвалентного церия). Полосы поглощения трехвалентного церия расположены в области 310-320 нм.

В настоящей работе измерены абсолютные спектры плазмы исследуемых смесей. Суть проведенных экспериментов заключается в следующем. Если имеется эталонный источник света, такой является вольфрамовая лампа СИРШ-8.5-200.1, которая заранее откалибрована в энергетических единицах в заданном диапазоне видимого излучения. До начала реакторных экспериментов сам диагностический канал калибруется в энергетических единицах и показания анализатора счета фотонов привязываются к энергетической шкале. Измеряя интенсивность испускаемых фотонов, напрямую можно подсчитать концентрацию возбужденных состояний и оценить коэффициент преобразования ядерной энергии в световую для каждого конкретного перехода. Именно абсолютные спектры позволяют исследовать преобразование ядерной энергии в световую и находить коэффициент преобразования населенности уровней, потоки заселения и опустошения различных состояний (в т.ч. ионизационные и рекомбинационные потоки). Абсолютная спектральная чувствительность установки [8] была прокалибрована с помощью отградуированной лампы СИРШ 8.5-200-1. Выражение для выходного сигнала системы регистрации R_λ при экспонировании излучения длины волны λ , соответствующей переходу $i-j$ имеет вид

$$R_\lambda = \omega I_\lambda S k(\lambda) \quad (1.1)$$

где ω – телесный угол, I_λ – яркость линии, S – визируемая площадка, $k(\lambda)$ – коэффициент, учитывающий чувствительность сис-

темы регистрации и потери света в элементах оптической схемы. В случае экспонирования источника сплошного спектра

$$R_\lambda^* = \omega B_\lambda D_\lambda d S k(\lambda) \quad (1.2)$$

где B_λ – спектральная плотность энергетической яркости, D_λ – обратная линейная дисперсия монохроматора, d – ширина входной щели. Таким образом, яркость линии

$$I_\lambda = \frac{R_\lambda}{R_\lambda^*} B_\lambda \Delta \lambda \quad (1.3)$$

где $\Delta \lambda$ – ширина аппаратного контура монохроматора. При высоких давлениях контур линии поглощения в большой степени определяется столкновительным излучением, вклад которого оказывается различным для разных линий.

Истинная величина яркости линии I_λ , отнесенная к единице длины источника, определяется по формуле [1]

$$I_\lambda = \frac{I_\lambda^*}{l S'(Xol)} \quad (1.4)$$

где I_λ^* – яркость линии, не исправленная на реабсорбацию, l – длина источника, $S'(Xol)$ – поправка на реабсорбцию, Xo – показатель поглощения в центре линии. Измерения в гелиевой плазме [1] показали, что реабсорбция линий, соответствующих наблюдаемым переходам, незначительна и ее влиянием можно пренебречь. В таблице 3 приведены значения измеренных яркостей линий, а также заселенности уровней.

Таблица 2 - Значения измеренных яркостей линий и заселенности уровней в гелиевой плазме.

	λ Нм	P 10^7 c^{-1}	$I_\lambda, 10^{-7}$ Вт/см ³ -35%	Заселенность уровней	
				Верх- него 10^6 см ⁻³	ниж- него 10^7 см ⁻¹
$2^1\text{P}-3^1\text{s}$	728.1	1.9	37	0.71	0.88
$2^1\text{P}-3^1\text{s}$	706.5	2.8	206	2.63	0.53
$2^1\text{P}-3^1\text{s}$	667.8	6.6	50.4	0.26	0.88
$2^1\text{P}-3^1\text{s}$	587.6	7.2	27.5	0.11	0.53
$2^1\text{P}-3^1\text{s}$	501.6	1.35	18.3	0.34	500

P-вероятность перехода

Наблюдаемые линии соответствуют переходам синглетных и триплетных уровней атома ${}^n\text{He}^*$ ($n = 3$). Видны также полосы 427.8; 470.9; 423.6; 391.4 и 419.9 нм первой отрицательной системы полос колебательно-возбужденного состояния $B^2 \sum_u^+$ иона N_2^+ , характерные для свечения плазмы газовой смеси ${}^3\text{He} - N_2$. Яркость этих полос соответствует паспортным данным содержания примеси азота в ${}^3\text{He}$ $2.5 \cdot 10^{-4}\%$ [1,2]. Согласно [3], такое количество примеси не влияет существенным образом на процессы возбуждения гелия в плазме, и высвечивание этих полос целиком обусловлено передачей возбуждения от гелия к азоту при неупругих столкновениях.

Помимо линий HeI и полос N_2^+ в спектрах наблюдаются относительно слабые молекулярные полосы, имеющие красное отклонение, часть из которых можно отождествить с полосами He_2^* . Однако, некоторые из полос смещены относительно известных в красную сторону. Возможно, эти полосы обусловлены переходами между слабосвязанными состояниями молекул He_3^* [5].

Измерения показали, что реабсорбация линий, соответствующих наблюдаемым переходам, незначительна и ее влиянием можно пренебречь.

Типичная спектрограмма излучения плазмы ${}^3\text{He}(n, p)T$ в диапазоне длин волн 400-800 нм показана на рисунке 3

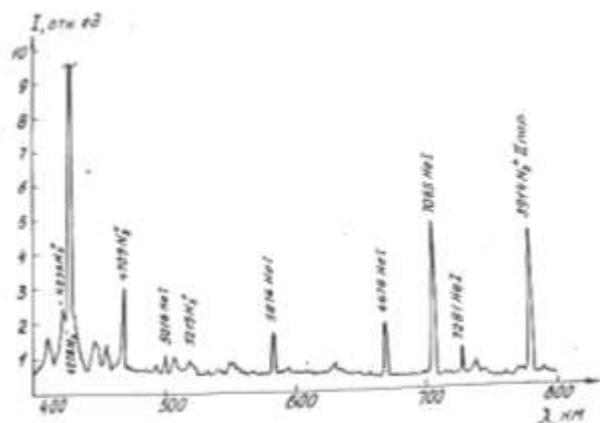


Рис. 3. Спектрограмма излучения плазмы ${}^3\text{He}(n, p)T$ при давлении 57 кПа, содержащей

примесь азота $2.5 \cdot 10^{-4}\%$ при облучении нейтронным потоком $\hat{O} = 4 \cdot 10^{12}$ н/см²с.

В таблице 3 представлены данные экспериментов по измерению абсолютных населенностей возбужденных атомов He^* ($n = 3$) при давлении 0.57 МПа и плотностях потока тепловых нейтронов $\hat{O} = 9 \cdot 10^{12}; 1.8 \cdot 10^{13}$ тепл. нейтр. см⁻²с⁻¹, а также длин волн наблюдаемых линий и вероятности переходов.

Выводы

Характерной особенностью спектров плотной ядерно-возбужденной плазмы является отсутствие линий, соответствующих переходам из возбужденных состояний атомов со значением главного квантового числа $n \geq 4$. Это обусловлено тем, что при высоком давлении частота столкновений возбужденных атомов с нормальными становится сравнимой с вероятностью спонтанного излучения. При столкновениях происходит передача возбуждения между уровнями с одинаковым главным квантовым числом, а также тушение возбужденных атомов. Наиболее вероятно, что основным механизмом тушения является реакция ассоциативной ионизации (реакция Хорнбека-Молнера).

Около 70% возбужденных состояний, образующихся в этих реакциях – это метастабильные состояния атомов. Реакция диссоциативной рекомбинации иона He_3^+ является малоизученной, а по энергетическим соображениям, наряду с образованием метастабильных атомов He^* ($n = 2$) и молекул He_2^* , в процессе диссоциации возможно заселение синглетных и триплетных уровней гелия He^* ($n = 3$). Для заселения уровней с $n = 3$ необходимо, чтобы электрон, участвующий в рекомбинации, имел энергию 0.7–1эВ.

Таким образом, для заселения уровней гелия ($n = 3$) в процессе диссоциативной рекомбинации димера He_2^+ ($v = 0$) и тримера

He_3^+ , необходимо преодолеть порог реакции примерно одинаковый для обоих ионов $\sim 0.7-1$ эВ.

Однако, вследствие большой разницы в величинах коэффициентов рекомбинации ($He_2^+ - \alpha_{\delta\delta e} = 3.0 \cdot 10^{-11} T_e^{-3/2}$;

$He_3^+ - \alpha_{\delta\delta e} = 1.86 \cdot 10^{-6} \cdot (0/26/T_e)^{1/2}$) заселение возбужденных уровней гелия ($n=3$) будет происходить, рекомбинационным потоком, идущим через ионы He_3^+ , даже если отношение $[He_2^+]/[He_3^+]$ составит два порядка величины.

Литература [1.] *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; [2.] *Дмитриевский В.А., Е.М.Воинов, Тетельбаум С.Д.* Применение гесафторидаурана в ядерных энергетических установках //Атомная энергия.-1970.-Т.29, №.4.- С.45-52; [3.] *Ильяшенко В.С., Миськевич А.И., Саламаха Б.С.* Регистрация спектров оптического излучения гелиевой плазмы в режиме счета отдельных фотонов// Оптика и спектроскопия-1979.- Vol.63, №1.-С.45-47; [4.] *Миськевич А.И.* Оптические спектры гелиевой плазмы.- Письма в ЖТФ-1980.-Т. 6.- №13.-С.8-9.

Принято в печать 12.04.10

УДК533.9.01

ПЛАЗМАНЫН ТОЗАНДЫК СПЕКТР ДИАГНОСТИКАСЫ ЭКСПЕРИМЕНТЫН САЛЫМЫ
СТАЦИОНАР РЕАКТОРДЫН ІШКІ ЗОНАНЫН САЛЫМЫ

Алматынський Технологічний Університет, Республіка Казахстан
sandybeck@kunakov.kz, [m.2909981](tel:+777272909981)

С.К. Конаков

Гелий плазманын спектралдык диагностикасы және экспериментын салымы қасиеттерге тозандық компонентінің салымы бұрын ұсынылған реакцияларның негізінде зерттелген.

EXPERIMENTAL SET FOR ABSOLUTE SPECTRAL MEASUREMENTS OF THE NUCLEAR INDUCED
PLASMAS, CREATED IN THE ACTIVE ZONE OF STATIONARY NUCLEAR REACTOR

Kunakov S.K.

Experimental probe investigations of nuclear induced plasma of high pressure, created by nuclear fragments are the main and essential part of the complex program directed to the solution of effective direct energy transformation of nuclear energy in to others. 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 which impossible to be done at once and actuality of this investigation is very vital up to nowadays.