

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

**Физический  
институт**



*имени  
П.Н. Лебедева*

РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

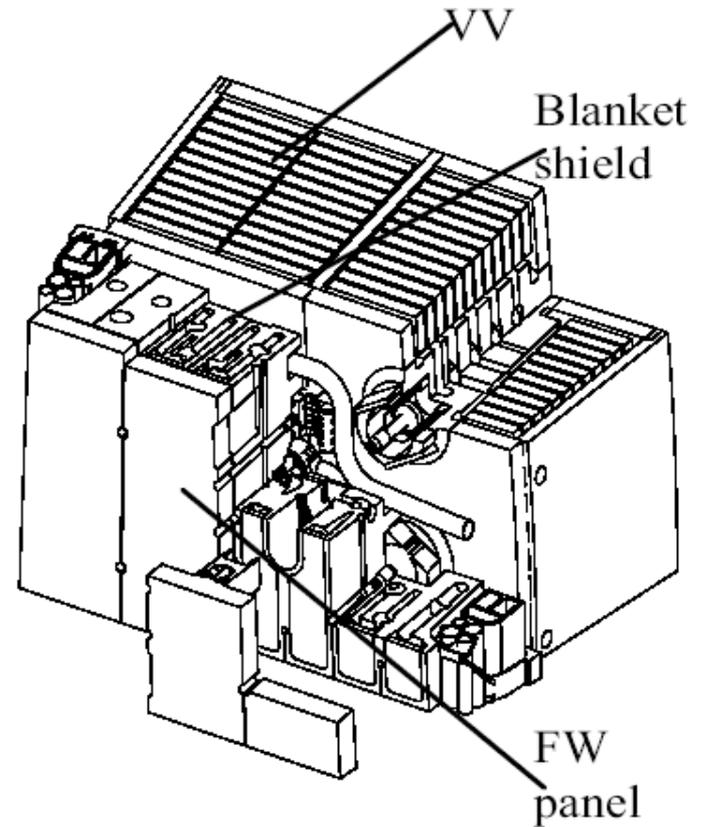
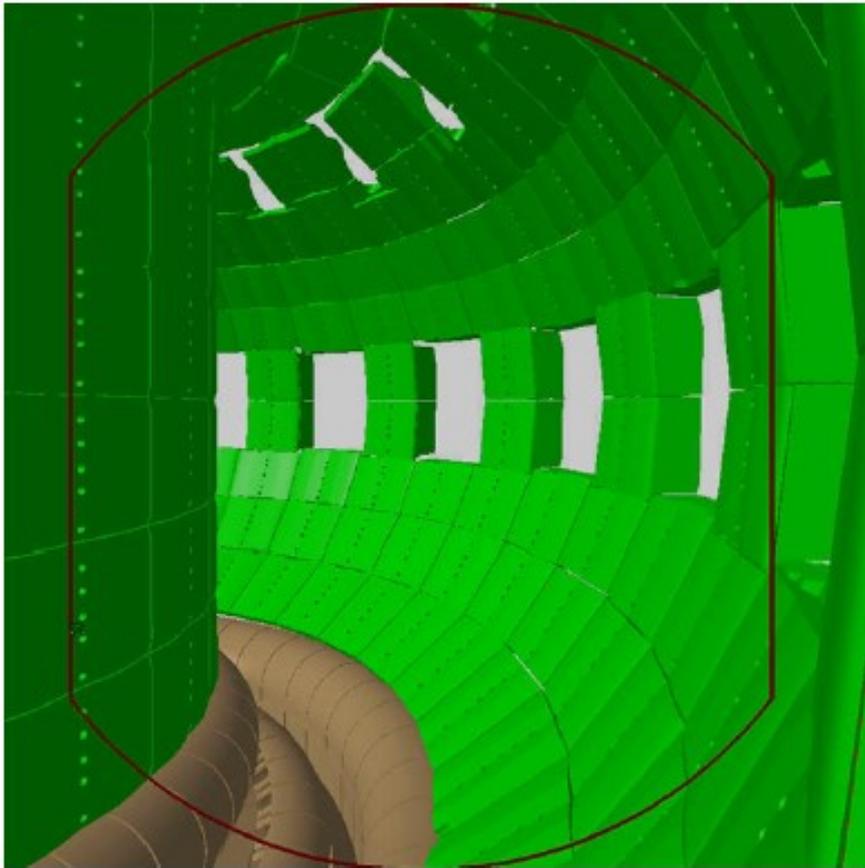
**Ф И А Н**



# **Спектроскопические методы определения плотности молекул воды в плазме**

*А.В. Бернацкий*

01.03.2017



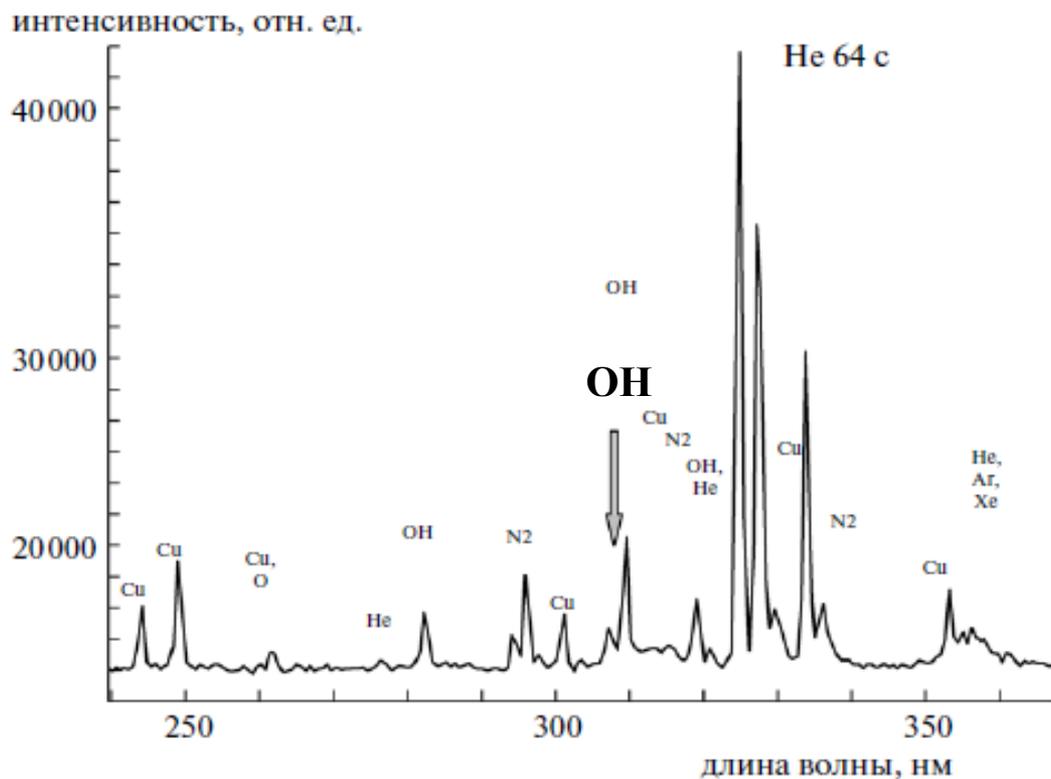
$$10^{-7} \text{ Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1} = 10^{-9} \text{ мбар} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1} = 10^{-6} \text{ мбар} \cdot \text{л} \cdot \text{с}^{-1} = 10^{-7} \text{ Вт}$$

или  $\sim 10^{13}$  молекул/с

2001 год: ITER Final Design Report No. G 31 DDD 14 01.07.19 W 0.1, Section 3.1: Vacuum Pumping and Fuelling Stems.

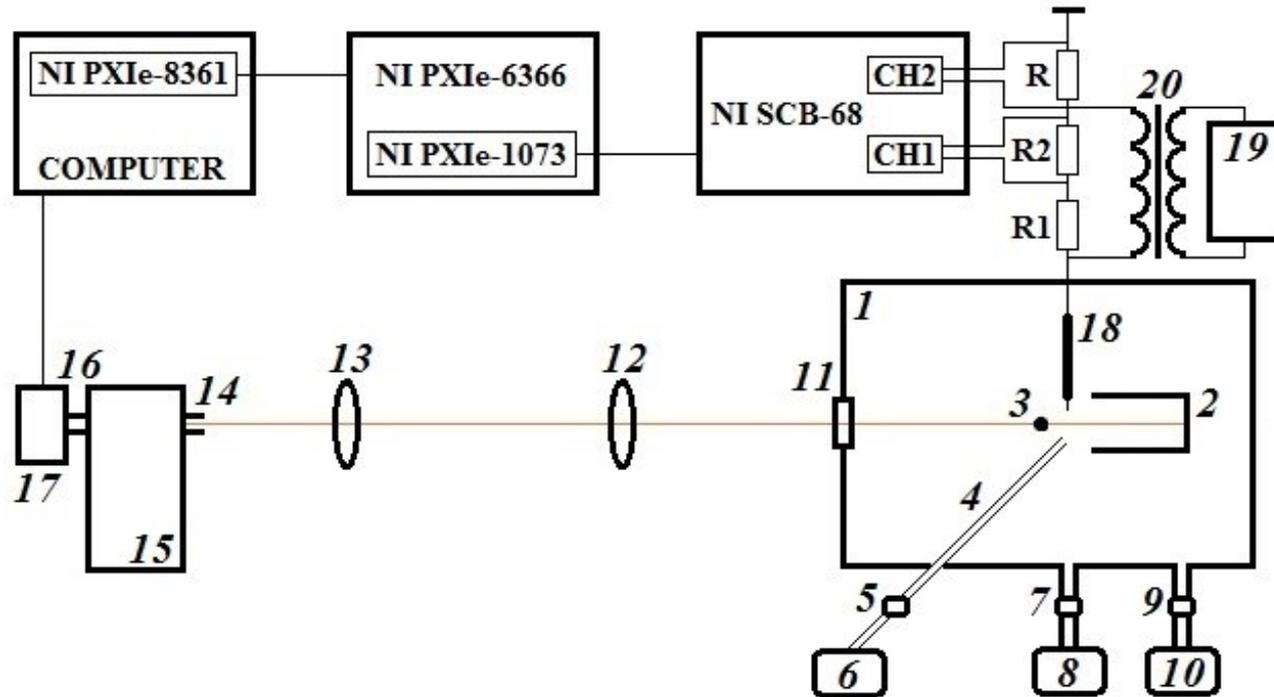
2012 год:

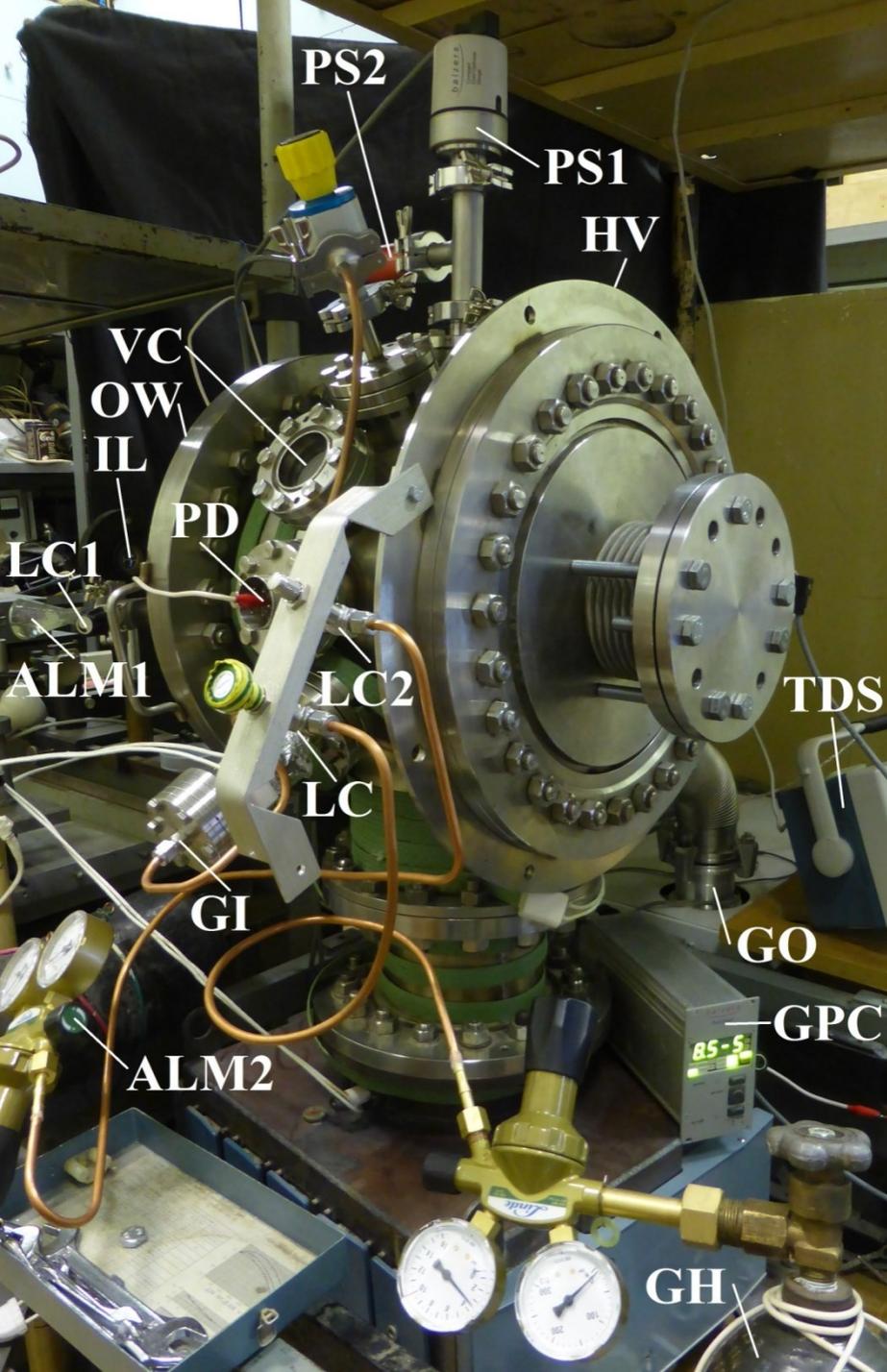
- Работа с МИФИ в рамках сервис-контракта с ИТЭР
- Создание установки «Течь» в ОНТП ФИАН
- Предложено использовать спектр ОН (306-320 нм) для диагностики течей воды
- Проведены калибровочные измерения
- Достигнута чувствительность на уровне  $10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{м}^3\cdot\text{с}^{-1}$



А.Б. Антипенков, О.Н. Афонин, В.Н. Очкин, С.Ю. Савинов, С.Н. Цхай. Экспериментальная проверка метода обнаружения микротечей воды в плазменно-вакуумной камере по спектру гидроксила // Физика плазмы. 2012, т. 38, № 3, с. 221-225. DOI: 10.1134/S1063780X12020018

# Схема установки «Течь»





**GO** – откачка камеры

**GI** – фланец напуска буферного газа (He)

**GH** – баллон с He

**LC** – натекатель Swagelock SS-4L

**ALM1** – колба с H<sub>2</sub>O

**LC1** – натекатель НПП-16

**ALM2** – баллон с Xe

**LC2** – натекатель Swagelok SS-4MG

**PS1** – датчик давления Balzers IKR250  
(10<sup>-2</sup>-10<sup>-9</sup> мбар )

**PS2** – датчик давления Pfeiffer TPR280  
(10<sup>-4</sup>-10<sup>3</sup> мбар)

**GPC** – блок управления датчиками  
давления Balzers TPG252A

**HV** – фланец ввода напряжения на  
разрядную систему

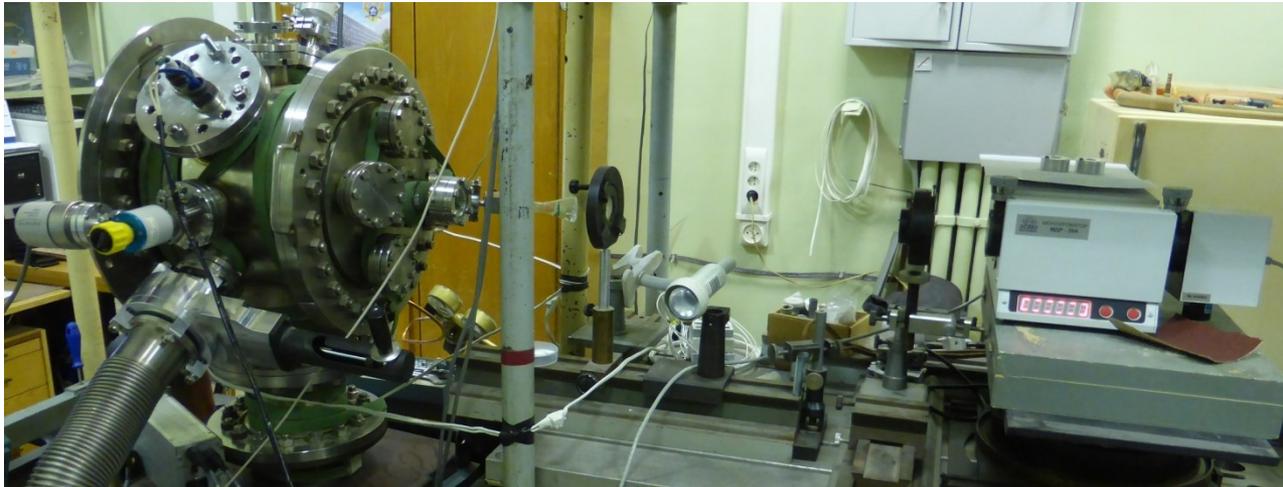
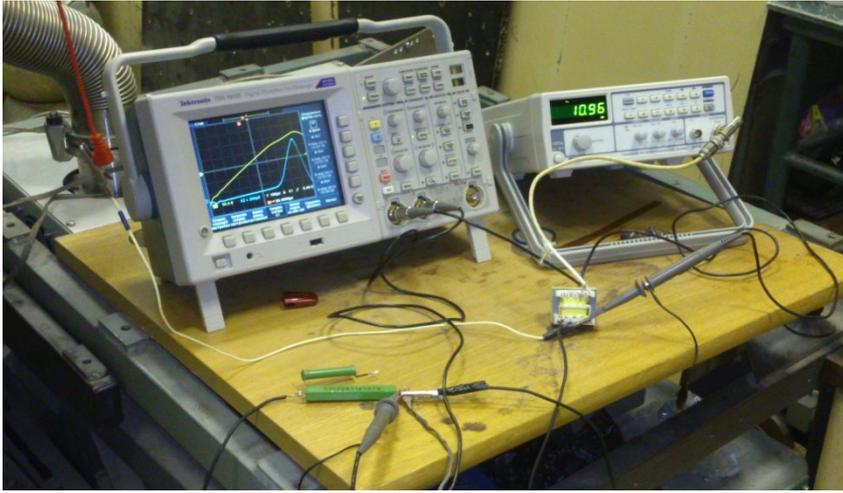
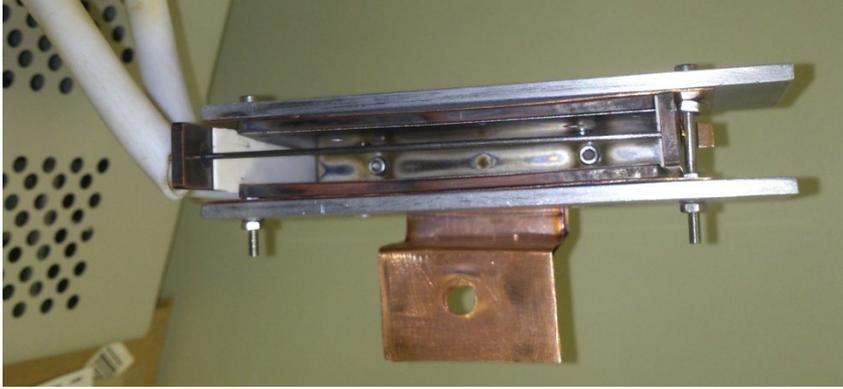
**PD** – фланец ввода зонда

**TDS** – осциллограф TDS3032C

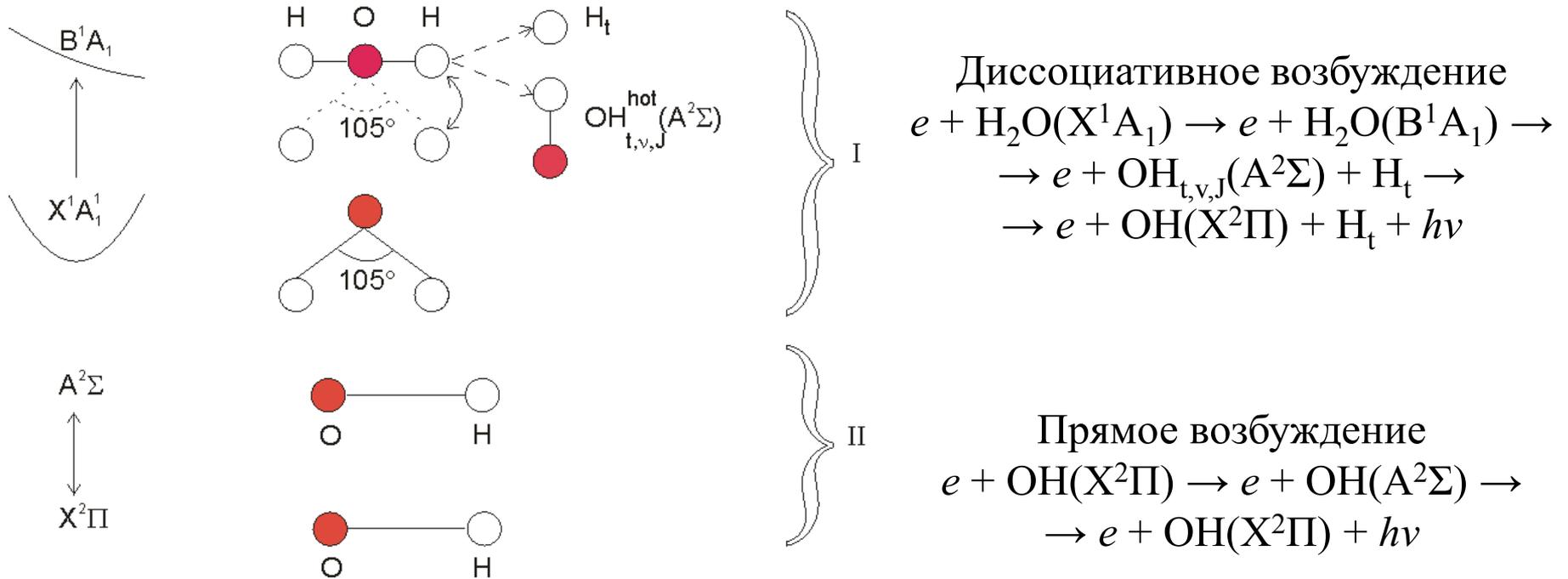
**VC** – фланец с кварцевым окном для  
визуальных наблюдений

**OW** – фланец с кварцевым окном для  
вывода излучения в спектральную систему

**IL** – входная линза спектральной системы



## Возбуждение излучающего состояния $\text{OH}(A^2\Sigma)$

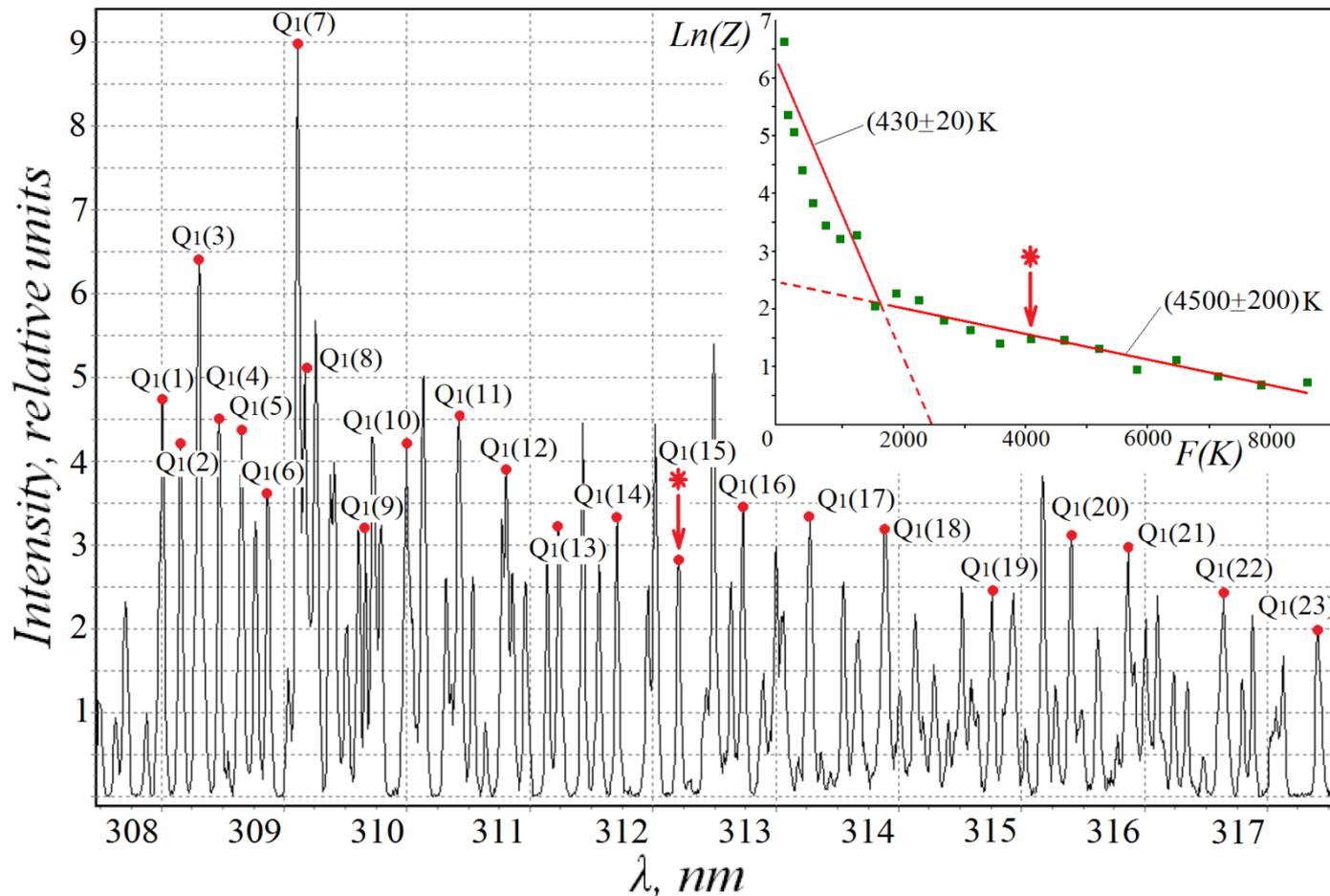


Интенсивность  $I$  линий “горячих” молекул для перехода  $\text{OH}(A^2\Sigma-X^2\Pi)$ :

$$I^{hot} = A \cdot N_{OH}^{hot} = n_e \cdot \langle v_e \cdot \sigma \rangle \cdot N_{H_2O}$$

где  $A$  – коэффициент Эйнштейна,  $N$  и  $n_e$  – концентрации тяжелых частиц и электронов,  $v_e$  – скорости электронов,  $\sigma$  – сечение диссоциативного возбуждения.

$$N_{H_2O} = N^{ph} \cdot (n_e \cdot \langle v_e \cdot \sigma \rangle)^{-1}$$



$$I_K = I_{K2} \cdot \frac{S_K}{S_{K^*}} \cdot \exp\left(\frac{h \cdot c}{k \cdot T_{hot}} \cdot [F(K^*) - F(K)]\right)$$

где  $I_K$ ,  $I_{K2}$  – интенсивности линий;  $S_K$ ,  $S_{K^*}$  – факторы Хенля-Лондона;  $h$  – постоянная Планка;  $c$  – скорость света;  $k$  – постоянная Больцмана;  $F(K)$ ,  $F(K^*)$  – энергия вращательного терма.

Тип установки, год публикации	Чувстви- тельность, $\text{Па}\cdot\text{м}^3\cdot\text{с}^{-1}$	Способ детектирования	Примечание
<i>Камера “Течь” 2012</i>	$10^{-5}$	Интегральная интенсивность полос гидроксидов	<i>Полый катод, локализация <math>1\text{ см}^3</math>, быстроедействие 10 с. Использовались калибровочные смеси</i>
Стелларатор Л-2М 2012, 2013	$10^{-4}$		Интенсивности линий ксенона
Tore Supra, лаборатория CEA-IRFM 2013	$10^{-2}$	Лазерная абсорбционная спектроскопия	Прямые измерения по поглощению света молекулами воды
	$10^{-5}$		Предельная экстраполяция прямых измерений
	$10^{-6}$		Планируемый уровень после модификации измерительной схемы
Разрядная камера ПР-2 2014	$10^{-4}$	Возникновение автоколебаний разряда при оксидации катода примесями	Эффект заметен при скорости натекания молекул воды $10^{16}\text{ с}^{-1}$ . Добавки воды по калиброванному химическому натекателю
<b>Камера “Течь” 2015</b>	<b><math>10^{-7}</math></b>	<b>Абсолютные интенсивности “горячих” линий ОН совместно с зондовыми измерениями.</b>	

А.В. Бернацкий, В.Н. Очкин, О.Н. Афонин, А.Б. Антипенков. Измерение концентраций молекул воды в плазме с помощью комбинации спектральных и зондовых методов // Физика плазмы. 2015, т. 41, № 9, с. 767-777. DOI: 10.7868/S0367292115090036

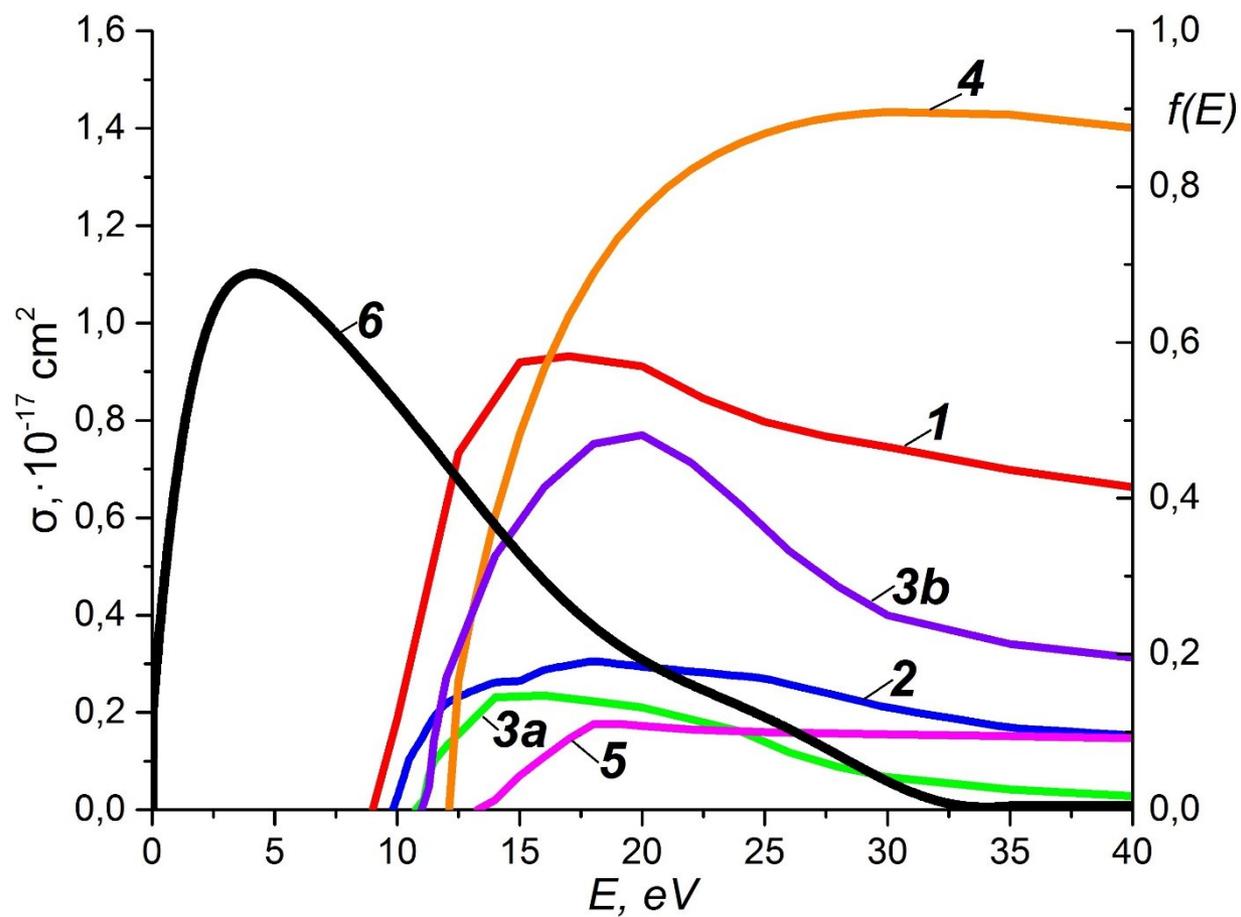
## *Метод оптической актинометрии.*

$$N_X = N_A \cdot \frac{I_X}{I_A} \cdot \frac{C_A}{C_X} \cdot \frac{\lambda_X}{\lambda_A} \cdot \frac{k_A}{k_X} \cdot \frac{A_A}{A_X} \cdot \frac{Q_X + A_X}{Q_A + A_A}$$

где  $I$  – интенсивности свечения;  $N$  – концентрация частиц;  $C$  – коэффициент, определяемый телесными углами собираемого излучения, пропусканием оптики, спектральной чувствительностью детектирования;  $\lambda$  – длина волны излучения;  $A$  – коэффициент Эйнштейна спонтанного излучения;  $Q$  – частота безызлучательного распада вследствие столкновений (тушение);  $k$  – коэффициент скорости возбуждения спектральных линий электронным ударом

$$\begin{cases} k = n_e \cdot \int \sigma(\varepsilon) \cdot f(\varepsilon) \cdot \sqrt{\varepsilon} \cdot d\varepsilon \\ \int f(\varepsilon) \cdot d\varepsilon = 1 \end{cases}$$

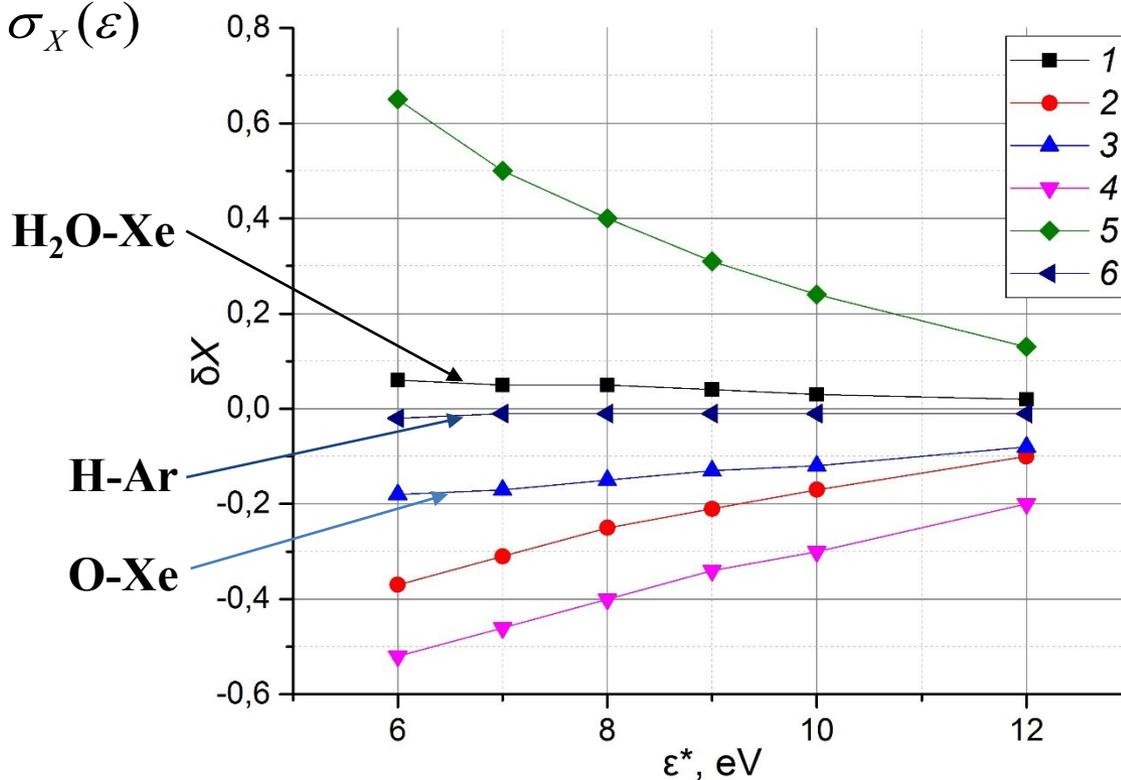
$\sigma(\varepsilon)$  – сечение возбуждения,  $f(\varepsilon)$  – функция распределения электронов по энергии  $\varepsilon$  (ФРЭЭ).



1 – H<sub>2</sub>O (306-320 nm); 2 – Xe (823 nm); 3a – O (777 nm); 3b – O (844 nm); 4 – H (656 nm);  
5 – Ar (751 nm); 6 – измеренная ФРЭЭ.

$$N_A \cdot \frac{I_X}{I_A} \cdot \frac{\lambda_X}{\lambda_A} \cdot \frac{C_A}{C_X} \cdot \frac{k_A}{k_X} \cdot \frac{A_A}{A_X} \cdot \frac{Q_X + A_X}{Q_A + A_A} = N_X = N_A \cdot \frac{I_X}{I_A} \cdot \frac{\lambda_X}{\lambda_A} \cdot \frac{C_A}{C_X} \cdot \Gamma \cdot \frac{A_A}{A_X} \cdot \frac{Q_X + A_X}{Q_A + A_A} \cdot (1 + \delta_X)$$

$$\sigma_A(\varepsilon) \approx \Gamma \cdot \sigma_X(\varepsilon)$$



Поправки  $\delta X$  для учета влияния максвелловских ФРЭЭ с различными средними энергиями  $\varepsilon^*$ .

Актинометрические пары:

**1 – H<sub>2</sub>O-Xe; 2 – H<sub>2</sub>O-Ar; 3 – O-Xe; 4 – O-Ar; 5 – H-Xe; 6 – H-Ar**

А.В. Бернацкий, В.Н. Очкин, Р.Н. Бафоев. Влияние распределения электронов по энергиям на измерение концентраций атомов методом оптической актинометрии // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2016, т. 43, № 6, с. 18-23. DOI: 10.3103/S1068335616060038

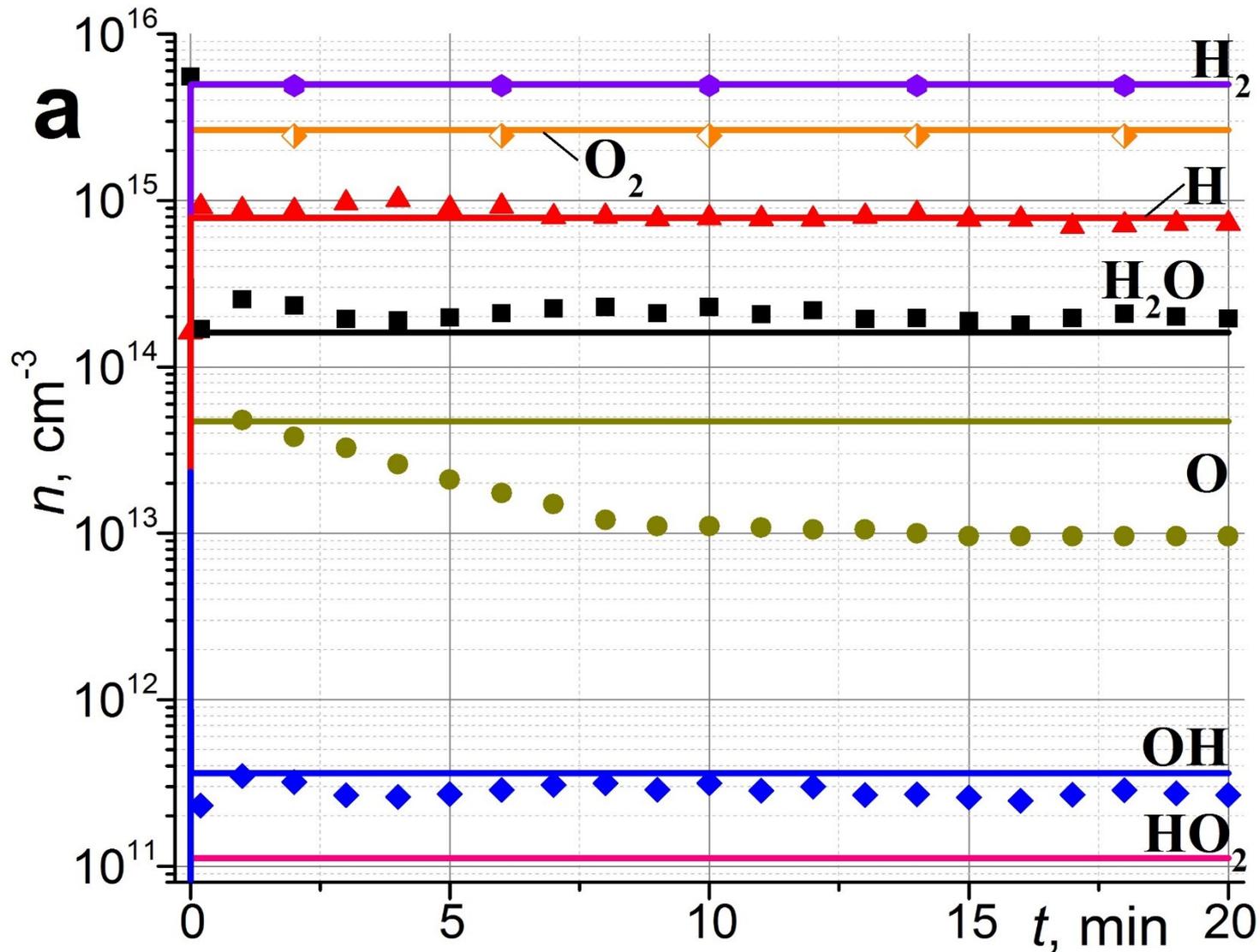
	Первое приближение							Второе приближение	
Частица	H <sub>2</sub> O	O	H	OH	He	Xe	Ar	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
<i>i, j</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Роль частицы	<i>X</i>	<i>X</i>	<i>X</i>	<i>X</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>P</i>	<i>P</i>

$$\left\{ \begin{array}{l}
 N_{1,6} = N_6 \cdot G_{16} \cdot R_{61}^{hot} \cdot I_{46}^{hot} \cdot \frac{Q_4 + A_4}{Q_6 + A_6} \\
 N_{1,7} = N_7 \cdot G_{17} \cdot R_{71}^{hot} \cdot I_{47}^{hot} \cdot \frac{Q_4 + A_4}{Q_7 + A_7} \\
 N_{2,6} = N_6 \cdot G_{26} \cdot R_{62} \cdot I_{26} \cdot \frac{Q_2 + A_2}{Q_6 + A_6} \\
 N_{2,7} = N_7 \cdot G_{27} \cdot R_{72} \cdot I_{27} \cdot \frac{Q_2 + A_2}{Q_6 + A_6} \\
 N_{3,6} = N_6 \cdot G_{36} \cdot R_{63} \cdot I_{36} \cdot \frac{Q_3 + A_3}{Q_6 + A_6} \\
 N_{3,7} = N_7 \cdot G_{37} \cdot R_{73} \cdot I_{37} \cdot \frac{Q_3 + A_3}{Q_6 + A_6} \\
 N_{4,6} = N_6 \cdot G_{16} \cdot R_{61}^{cold} \cdot I_{16}^{cold} \cdot \frac{Q_4 + A_4}{Q_6 + A_6}
 \end{array} \right.$$

$$\frac{C_A}{C_X} \cdot \frac{v_A}{v_X} \cdot \frac{A_A}{A_X} = G_{AX} \quad \frac{I_A}{I_X} = I_{XA} \quad \frac{k_A}{k_X} = R_{AX}$$

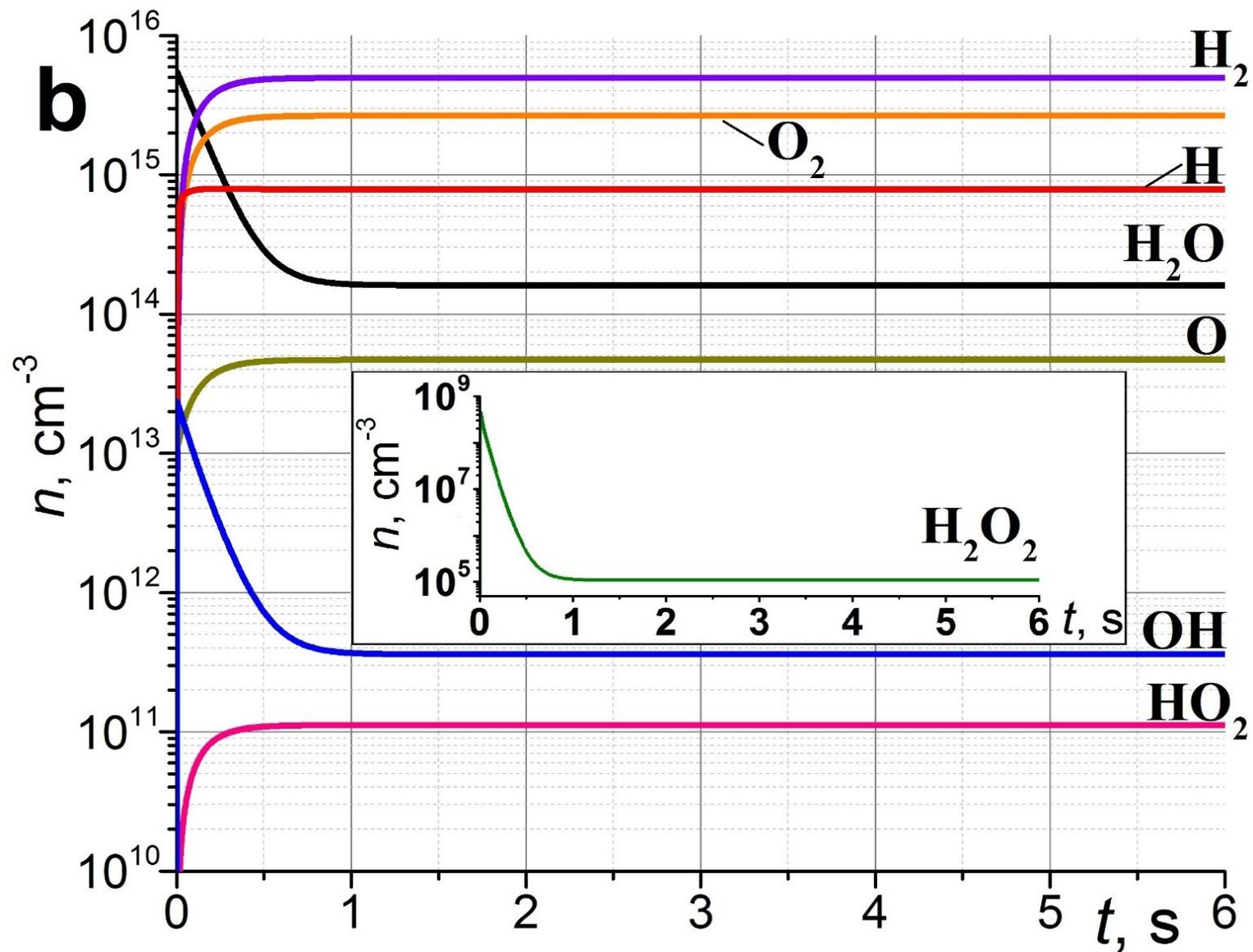
$$\left\{ \begin{array}{l}
 N_1 = (N_{1,6} + N_{1,7})/2 \\
 N_2 = (N_{2,6} + N_{2,7})/2 \\
 N_3 = (N_{3,6} + N_{3,7})/2 \\
 N_4 = N_{4,6}
 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
 Q_1 = Q_4 = q_{41} \cdot N_1 + q_{42} \cdot N_2 + q_{43} \cdot N_3 + q_{45} \cdot N_5 + q_{46} \cdot N_6 + q_{47} \cdot N_7 \\
 Q_2 = q_{21} \cdot N_1 + q_{22} \cdot N_2 + q_{23} \cdot N_3 + q_{25} \cdot N_5 + q_{26} \cdot N_6 + q_{27} \cdot N_7 \\
 Q_3 = q_{31} \cdot N_1 + q_{32} \cdot N_2 + q_{33} \cdot N_3 + q_{35} \cdot N_5 + q_{36} \cdot N_6 + q_{37} \cdot N_7 \\
 Q_5 = q_{51} \cdot N_1 + q_{52} \cdot N_2 + q_{53} \cdot N_3 + q_{55} \cdot N_5 + q_{56} \cdot N_6 + q_{57} \cdot N_7 \\
 Q_6 = q_{61} \cdot N_1 + q_{62} \cdot N_2 + q_{63} \cdot N_3 + q_{65} \cdot N_5 + q_{66} \cdot N_6 + q_{67} \cdot N_7 \\
 Q_7 = q_{71} \cdot N_1 + q_{72} \cdot N_2 + q_{73} \cdot N_3 + q_{75} \cdot N_5 + q_{76} \cdot N_6 + q_{77} \cdot N_7
 \end{array} \right.$$

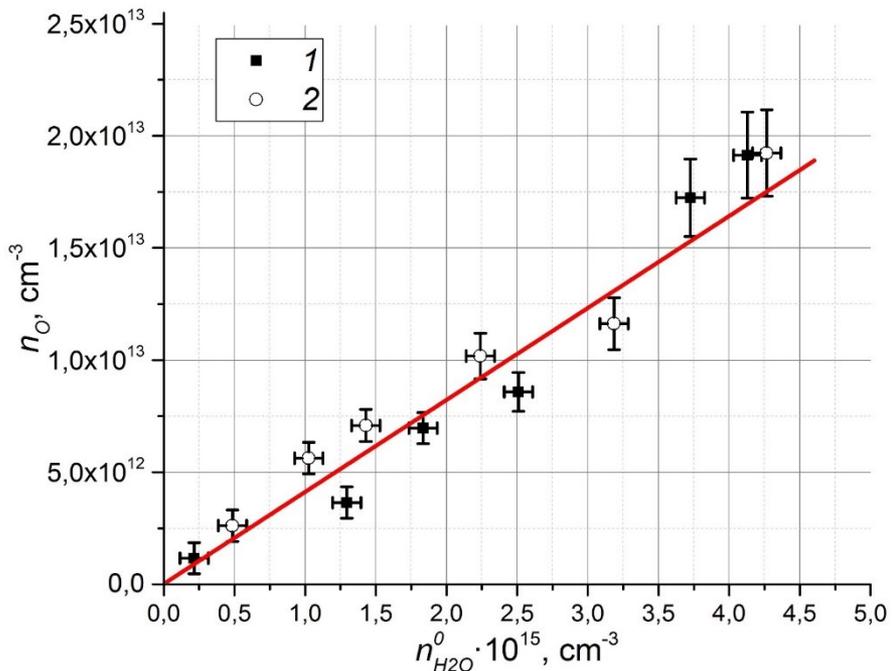


A.V. Bernatskiy, V.N. Ochkin, I.V. Kochetov. Multispectral actinometry of water and water derivate molecules in moist inert gas discharge plasmas // Journal of Physics D: Applied Physics. 2016, V. 49, No. 39, 395204 (10pp). DOI: 10.1088/0022-3727/49/39/395204

№	Реакция	Константа скорости реакции $k(T)$ , $\text{с}^{-1}$ , $\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ , $\text{см}^6 \cdot \text{с}^{-1}$	$k(T)$ при $T=430 \text{ К}$ , $\text{с}^{-1}$ , $\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ , $\text{см}^6 \cdot \text{с}^{-1}$
Диссоциация молекул электронами плазмы, $T_e=9 \text{ эВ}$			
R1	$\text{H}_2\text{O} + e \Rightarrow \text{OH} + \text{H} + e$	-	$1.2 \cdot 10^{-8}$
R2	$\text{O}_2 + e \Rightarrow \text{O} + \text{O} + e$	-	$1.8 \cdot 10^{-8}$
R3	$\text{H}_2 + e \Rightarrow \text{H} + \text{H} + e$	-	$8.2 \cdot 10^{-9}$
Химические реакции в объеме			
R4	$\text{OH} + \text{H} + \text{He} \Leftrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{He}$	$4.3 \cdot 10^{-25} T^{2.6}$	$6.1 \cdot 10^{-32}$
R5	$\text{OH} + \text{OH} \Leftrightarrow \text{O} + \text{H}_2\text{O}$	$5.56 \cdot 10^{-20} T^{2.6} e^{-1.926/RT}$	$1.4 \cdot 10^{-14}$
R6	$\text{OH} + \text{OH} \Leftrightarrow \text{H} + \text{HO}_2$	$8.2 \cdot 10^{-40}$	$8.2 \cdot 10^{-40}$
R7	$\text{H} + \text{HO}_2 \Leftrightarrow \text{H}_2 + \text{O}_2$	$1.75 \cdot 10^{-10} e^{-2.045/RT}$	$1.6 \cdot 10^{-11}$
R8	$\text{OH} + \text{O} \Leftrightarrow \text{H} + \text{O}_2$	$2.0 \cdot 10^{-10} \cdot T^{0.352} e^{0.244/RT}$	$3.1 \cdot 10^{-11}$
R9	$\text{OH} + \text{H} \Leftrightarrow \text{O} + \text{H}_2$	$8.0 \cdot 10^{-21} \cdot T^{2.8} e^{-3.875/RT}$	$2.0 \cdot 10^{-15}$
R10	$\text{OH} + \text{HO}_2 \Leftrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$	$4.8 \cdot 10^{-11} e^{0.496/RT}$	$8.6 \cdot 10^{-11}$
R11	$\text{OH} + \text{H}_2 \Leftrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{H}$	$3.6 \cdot 10^{-16} \cdot T^{1.52} e^{-3.455/RT}$	$6.3 \cdot 10^{-14}$
R12	$\text{HO}_2 + \text{O} \Leftrightarrow \text{OH} + \text{O}_2$	$2.7 \cdot 10^{-11} \cdot e^{0.445/RT}$	$4.5 \cdot 10^{-11}$
R13	$\text{H} + \text{H}_2\text{O}_2 \Leftrightarrow \text{HO}_2 + \text{H}_2$	$2.8 \cdot 10^{-12} \cdot e^{-3.75/RT}$	$3.5 \cdot 10^{-14}$
R14	$\text{H} + \text{H}_2\text{O}_2 \Leftrightarrow \text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	$1.7 \cdot 10^{-11} \cdot e^{-3.57/RT}$	$2.6 \cdot 10^{-13}$
R15	$\text{H} + \text{HO}_2 \Leftrightarrow \text{O} + \text{H}_2\text{O}$	$5.0 \cdot 10^{-11} \cdot e^{-1.72/RT}$	$6.7 \cdot 10^{-12}$
R16	$\text{H} + \text{H} + \text{M} \Leftrightarrow \text{H}_2 + \text{M}$	$1.76 \cdot 10^{-30} \cdot T^{-1}$	$4.1 \cdot 10^{-33}$
R17	$\text{OH} + \text{O} + \text{M} \Leftrightarrow \text{HO}_2 + \text{M}$	$4.0 \cdot 10^{-32}$	$4.0 \cdot 10^{-32}$
R18	$\text{OH} + \text{OH} + \text{M} \Leftrightarrow \text{H}_2\text{O}_2 + \text{M}$	$8.0 \cdot 10^{-31} \cdot T^{-0.76}$	$8.0 \cdot 10^{-33}$
R19	$\text{O} + \text{H}_2\text{O}_2 \Leftrightarrow \text{HO}_2 + \text{OH}$	$4.65 \cdot 10^{-11} \cdot e^{-6.4/RT}$	$2.6 \cdot 10^{-14}$
R20	$\text{O} + \text{H} + \text{M} \Leftrightarrow \text{OH} + \text{M}$	$1.3 \cdot 10^{-29} \cdot T^{-1}$	$3.0 \cdot 10^{-32}$
R21	$\text{H} + \text{O}_2 + \text{M} \Leftrightarrow \text{HO}_2 + \text{M}$	$5.5 \cdot 10^{-30} \cdot T^{-0.8}$	$4.3 \cdot 10^{-32}$
R22	$\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2 \Leftrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{HO}_2$	$2.72 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-29.57/RT}$ $+ 3.2 \cdot 10^{-12} \cdot e^{-0.427/RT}$	$1.9 \cdot 10^{-12}$
R23	$\text{O} + \text{O} + \text{M} \Leftrightarrow \text{O}_2 + \text{M}$	$2.76 \cdot 10^{-31} \cdot T^{-1}$	$6.4 \cdot 10^{-34}$
Химические реакции на стенке			
R24	$\text{H} + \text{H}_w \Rightarrow \text{H}_2$		$5.0 \cdot 10^1$
R25	$\text{O} + \text{O}_w \Rightarrow \text{O}_2$		$1.0 \cdot 10^3$
R26	$\text{OH} + \text{OH}_w \Rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{O}$		$1.2 \cdot 10^2$
R27	$\text{H} + \text{OH}_w \Rightarrow \text{H}_2\text{O}$		1.0



# Смесь (He+Xe+Ar)+D<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O



Концентрация атомов кислорода O

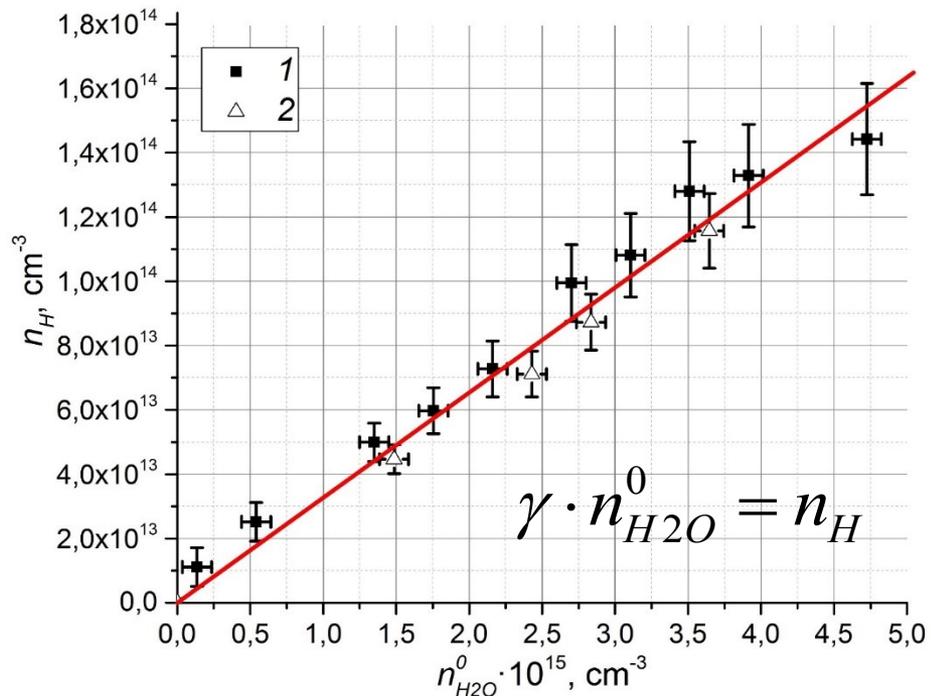
1 – измерения по линии 777 нм

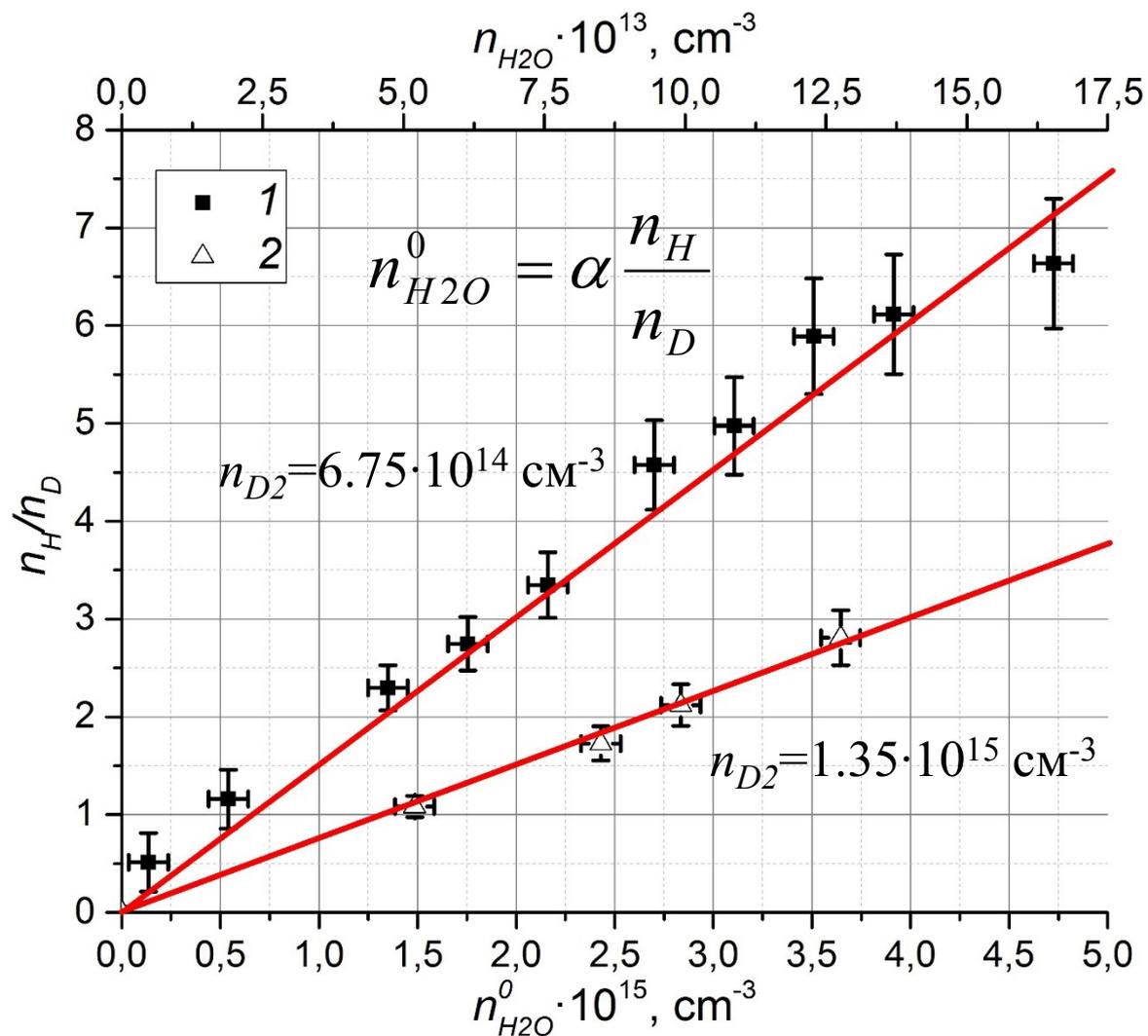
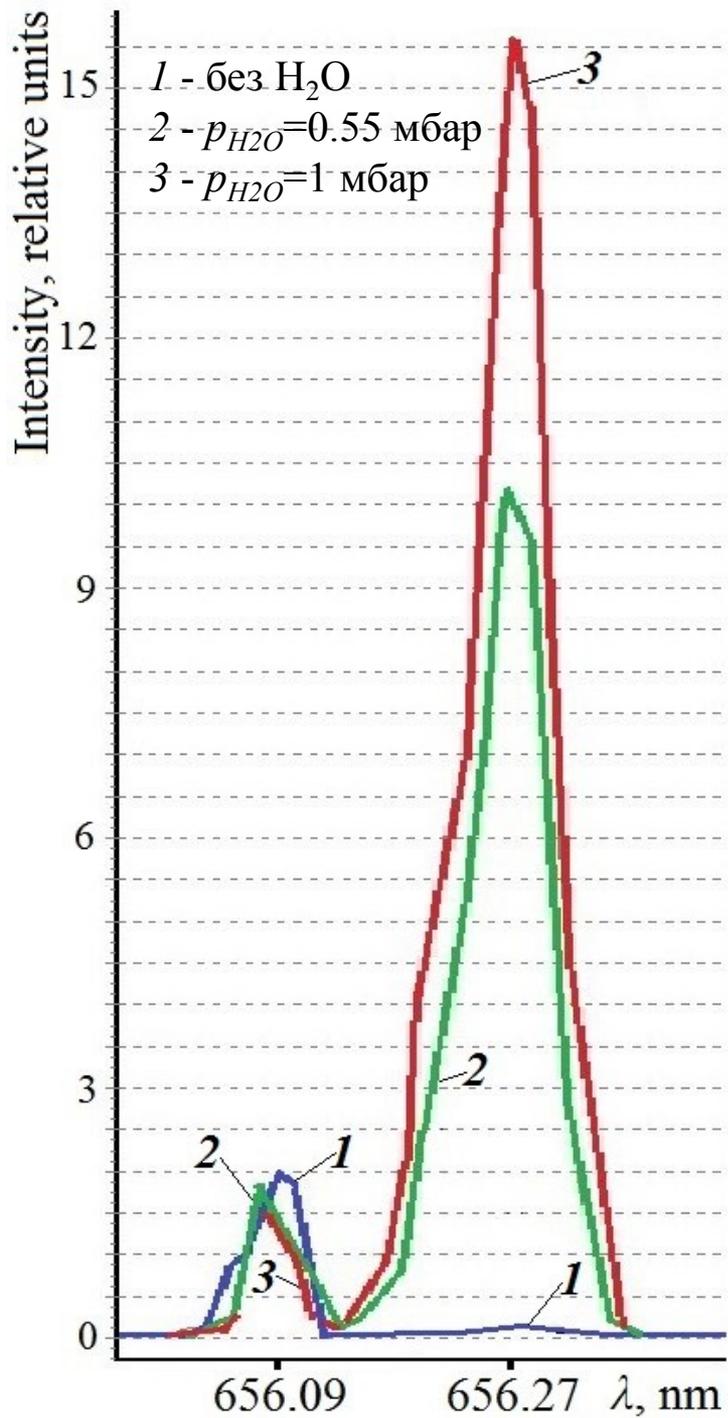
2 – измерения по линии 844 нм

Концентрация атомов водорода H

$$1 - n_{D_2} = 6.75 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$

$$2 - n_{D_2} = 1.35 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$





Смесь (He+Xe+Ar)+D<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O

1 -  $n_{D_2} = 6.75 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$

2 -  $n_{D_2} = 1.35 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

$$n_H = n_D \cdot \frac{I_H}{I_D} \cdot \frac{C_D}{C_H} \cdot \frac{\lambda_H}{\lambda_D} \cdot \frac{k_D}{k_H} \cdot \frac{A_D}{A_H} \cdot \frac{Q_H + A_H}{Q_D + A_D}$$

$$\gamma \cdot n_{H_2O}^0 = n_H \quad n_{H_2O}^0 = \alpha \frac{n_H}{n_D} \quad \alpha = \frac{n_D}{\gamma}$$

$$\Gamma^0 = \Delta(n_{H_2O}^0) / \Delta t = \alpha \cdot \Delta \left( \frac{n_H}{n_D} \right) / \Delta t$$

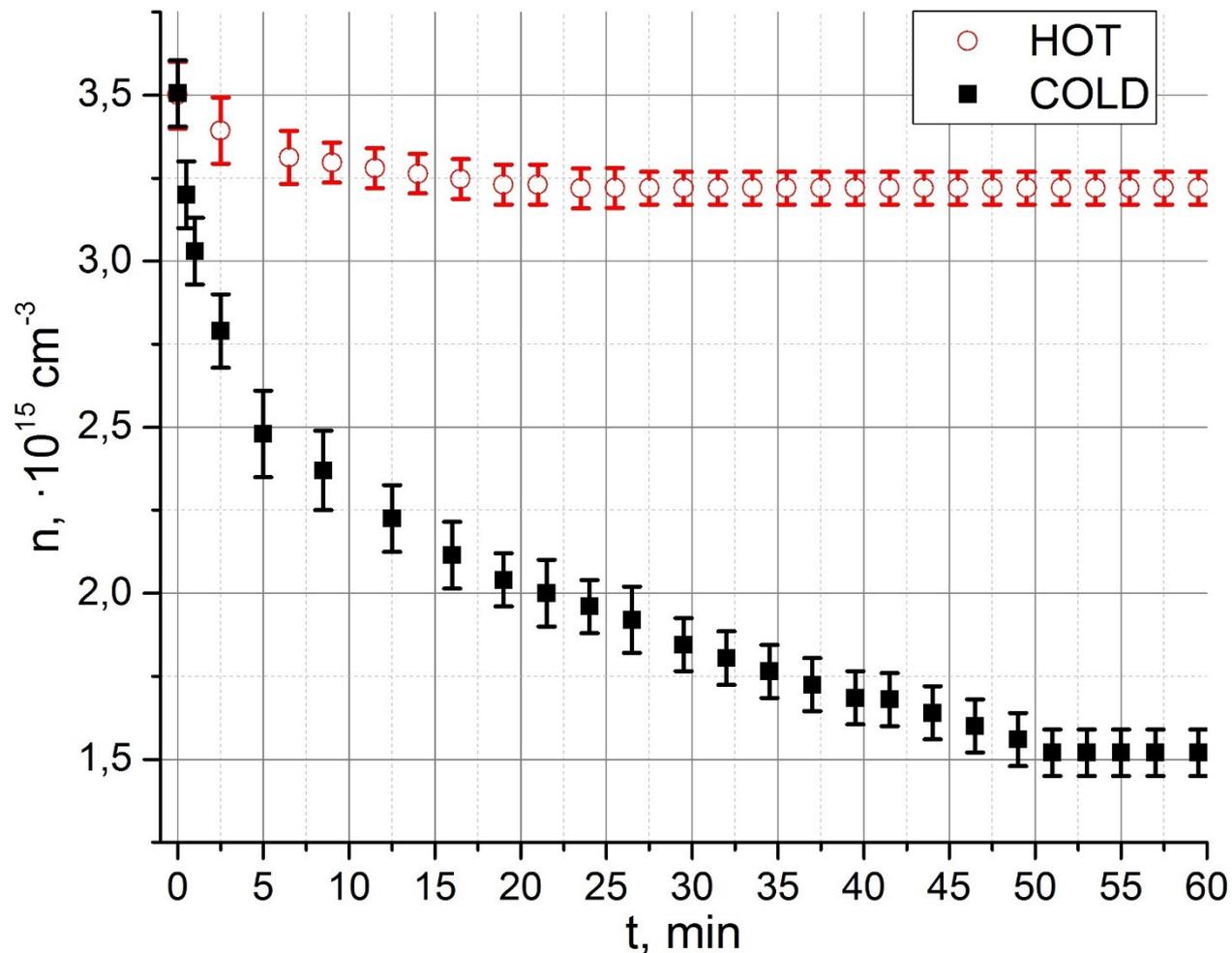
$\Gamma, \Gamma^0$ – ПОТОКИ ВОДЫ	измерения		экстраполяция		
$p_{D_2}$ , мбар	$5 \cdot 10^{-2}$	$2.5 \cdot 10^{-2}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$
$\alpha$ , см <sup>-3</sup>	$1.4 \cdot 10^{15}$	$7 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{13}$	$3 \cdot 10^{12}$
$\Gamma^0(1 \text{ с})$ , Па·м <sup>3</sup> ·с <sup>-1</sup>	$3 \cdot 10^{-6}$	$1.4 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-8}$	<b><math>6 \cdot 10^{-9}</math></b>
$\Gamma(1 \text{ с})$ , Па·м <sup>3</sup> ·с <sup>-1</sup>	$8 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$2 \cdot 10^{-9}$	<b><math>2 \cdot 10^{-10}</math></b>
$\Gamma^0(10 \text{ с})$ , Па·м <sup>3</sup> ·с <sup>-1</sup>	$3 \cdot 10^{-7}$	$1.4 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-9}$	<b><math>6 \cdot 10^{-10}</math></b>
$\Gamma(10 \text{ с})$ , Па·м <sup>3</sup> ·с <sup>-1</sup>	$8 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-9}$	$2 \cdot 10^{-10}$	<b><math>2 \cdot 10^{-11}</math></b>

## Выводы:

- Предложена и реализована модель измерений абсолютных концентраций молекул воды по свечению гидроксила в отсутствии равновесия.
- Реализован метод оптической актинометрии (ОА) для исключения зондовых измерений.
- Произведена оценка поправок связанных с необходимостью знания вида ФРЭЭ в методе ОА.
- Впервые предложено и реализовано одновременное использование нескольких актинометров для определения компонентного состава плазмы (мультиспектральная актинометрия).
- Предложена методика учета тушения излучающих состояний в методе ОА.
- Разработана модель плазмохимических реакций. Достигнуто согласование результатов измерений с моделью.
- Установлено, что наличие в объёме локального плазменного источника существенно меняет динамику поведения плотности паров воды, что связывается именно с появлением новых активных частиц в неравновесных процессах быстрого, по сравнению с адсорбцией, плазмохимического разложения исходных молекул.
- Измерения концентрации молекул воды предложенной методикой, основанной на ОА, согласуются с результатами параллельных измерений методом диодной лазерной спектроскопии.
- **Впервые достигнута чувствительность измерений скорости натекания частиц отвечающая требованиям разработчиков ИТЭР ( $\Gamma < 10^{-7}$  Па·м<sup>3</sup>·с<sup>-1</sup>).**

1. А.Б. Антипенков, О.Н. Афонин, А.В. Бернацкий, В.Н. Очкин. Измерение концентрации молекул воды по абсолютной интенсивности спектра гидроксила в тлеющем разряде с полым катодом // Ядерная физика и инжиниринг. 2014, т. 5, № 7-8, с. 644-648. DOI: 10.1134/S2079562914070021
2. А.В. Бернацкий, В.Н. Очкин, О.Н. Афонин, А.Б. Антипенков. Измерение концентраций молекул воды в плазме с помощью комбинации спектральных и зондовых методов // Физика плазмы. 2015, т. 41, № 9, с. 767-777. DOI: 10.7868/S0367292115090036
3. А.В. Бернацкий, В.Н. Очкин. Детектирование примесей воды в плазме методом оптической актинометрии // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2015, т. 42, № 9, с. 30-35. DOI: 10.3103/S1068335615090055
4. A.V. Bernatskiy, V.N. Ochkin, R.N. Bafoev. The role of the heating of the vacuum chamber on the water content in plasma and gas // Journal of Physics: Conference Series. 2016, V. 747, 012013. DOI: 10.1088/1742-6596/747/1/012013
5. А.В. Бернацкий, В.Н. Очкин, Р.Н. Бафоев, А.Б. Антипенков. Динамика плотности молекул воды в разрядной камере, заполненной влажным газом при низком давлении // Физика плазмы. 2016, т. 42, № 10, с. 949-954. DOI: 10.7868/S0367292116100012
6. А.В. Бернацкий, В.Н. Очкин, Р.Н. Бафоев. Влияние распределения электронов по энергиям на измерение концентраций атомов методом оптической актинометрии // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2016, т. 43, № 6, с. 18-23. DOI: 10.3103/S1068335616060038
7. A.V. Bernatskiy, V.N. Ochkin, I.V. Kochetov. Multispectral actinometry of water and water derivate molecules in moist inert gas discharge plasmas // Journal of Physics D: Applied Physics. 2016, V. 49, No. 39, 395204 (10pp). DOI: 10.1088/0022-3727/49/39/395204
8. A.V. Bernatskiy, V.V. Lagunov, V.N. Ochkin, S.N. Tskhai. Study of water molecule decomposition in plasma by diode laser spectroscopy and optical actinometry methods // Laser Physics Letters. 2016, V. 13, No. 7, 075702 (4pp). DOI: 10.1088/1612-2011/13/7/075702
9. В.Н. Очкин, А.В. Бернацкий. Новые методы определения концентраций молекул воды и её фрагментов в плазме по эмиссионным электронным спектрам // М.: РИИС ФИАН, 2016. – 78 с. ISBN: 978-5-902622-32-1
10. A.V. Bernatskiy, V.N. Ochkin. Detection of water molecules in inert gas based plasma by the ratios of atomic spectral lines // Plasma Sources Science and Technology. 2017, V. 26, No. 1, 015002 (5pp). DOI: 10.1088/0963-0252/26/1/015002

*Спасибо за внимание*



Изменения во времени концентраций молекул воды при холодных (295K) и нагретых (395K) стенках камеры без разряда.

Начальная концентрация молекул воды  $n_0 = 3.5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

Настоящая работа					Расчеты работ других авторов				
$T_w$ , К	$N \cdot 10^{19}$	$P_N$ , Па	$N_A \cdot 10^{19}$	$\theta$	$T_w$ , К	$N \cdot 10^{19}$	$P_N$ , Па	$N_A \cdot 10^{19}$	$\theta$
295	4.8	7	2.9	3.9	295	-	7	-	4
395	7	12.1	0.7	0.9	395	-	12	-	0.7

$T_w$  – температура стенок;  $N$  – концентрация молекул воды в состоянии термодинамического равновесия с адсорбированными молекулами;  $P_N$  – парциальное давление;  $N_A$  – концентрация адсорбированных молекул;  $\theta$  – степень покрытия (количество монослоёв на поверхности)

	$T_w$ , К	$\tau_d$ , с	$(\langle v_e \cdot \sigma_{e,diss} \rangle)^{-1}$ , с	$N_s/N_0$
Без разряда	295	$\tau_d = \tau_{A0} = 1000 \pm 100$		$0.72 \pm 0.02$
	395	$\tau_d = \tau_{A0} = 2500 \pm 100$		$0.92 \pm 0.01$
С разрядом	295	$\tau_d = \tau_{diss} \leq 15 \pm 10$	$\tau_{diss} = 5 \pm 0.3$	$0.1 \pm 0.02$
	395	$\tau_d = \tau_{diss} \leq 15 \pm 10$		$0.2 \pm 0.02$

$\tau_d$  – время убыли молекул в начальной фазе;  $\tau_{A0}$  – время адсорбции;  $\tau_{diss}$  – время диссоциации;  $N_s$  – концентрация молекул в фазе насыщения и термодинамического равновесия;  $N_0$  – начальная концентрация молекул воды

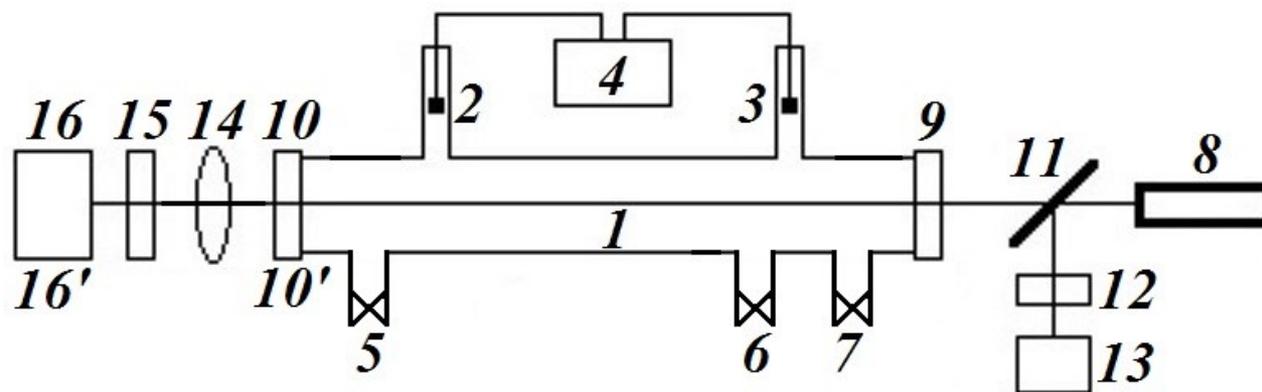
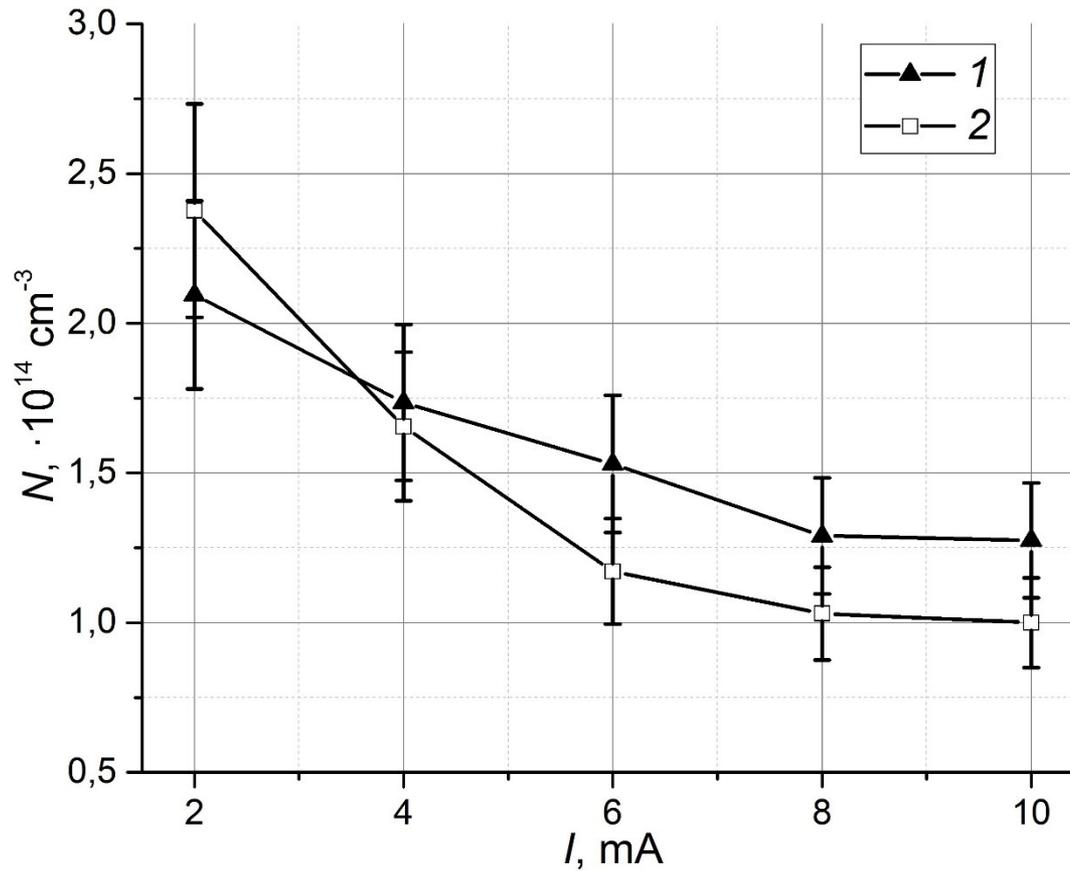


Схема установки.





Результаты измерений концентрации молекул воды  $N$  при разных токах разряда.

$1$  – метод ДЛС;  $2$  – метод ОА.

$$N^0_{H_2O} = 8 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$