

# Kinetic Processes of Argon-Helium Plasma of a Pulsed Discharge

A. V. Juriev, Yu. A. Adamenkov, M. A. Gorbunov, E. V. Kabak,  
A. A. Kalacheva, V. A. Shaidulina

*FSUE "RFNC – VNIIEF"*

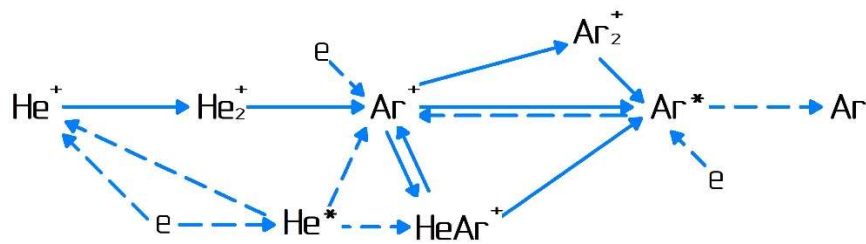
*Sarov, 607190, Russia*

*alexjuriev3142@gmail.com*

## Abstract

The article presents a theoretical investigation of the kinetic processes occurring in the argon-helium plasma of a pulsed discharge. A model of argon-helium plasma was created and the main reactions of formation and quenching of plasma particles were studied. A general scheme of kinetic processes of the plasma of inert gases of a pulsed discharge has been formed.

Keywords: optically pumped rare gas laser (OPRGL), kinetic model, argon-helium plasma, rate of reaction



Kinetic reactions of Ar-He plasma

УДК: 621.378.2

# Кинетические процессы аргоно-гелиевой плазмы импульсного разряда

А. В. Юрьев, Ю. А. Адаменков, М. А. Горбунов, Е. В. Кабак,  
А. А. Калачева, В. А. Шайдулина

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»  
Россия, г. Саров, 607190, ул. Мира, 37  
alexjuriev3142@gmail.com

## Аннотация

В работе представлено теоретическое исследование кинетических процессов, протекающих в аргоно-гелиевой плазме импульсного разряда. Создана модель аргоно-гелиевой плазмы и проведено исследование ключевых механизмов образования и гибели частиц плазмы. Сформирована общая схема кинетических процессов, происходящих в плазме инертных газов импульсного разряда.

Ключевые слова: лазер с оптической накачкой на инертных газах (ЛОНИГ), кинетическая модель, аргоно-гелиевая плазма, скорость реакции

## 1. Введение

Одной из актуальных проблем лазерной физики является создание непрерывного мощного лазера с высоким качеством выходного излучения. Лазер с оптической накачкой на инертных газах (ЛОНИГ) относится к новым перспективным лазерам настоящего времени, основными преимуществами которого являются высокая удельная мощность, химически инертная и однородная активная среда и высокое качество выходного луча.

В ИЛФИ РФЯЦ ВНИИЭФ работы по исследованию ЛОНИГ ведутся с 2018 года. Была получена лазерная генерация на метастабильных состояниях аргона в смеси Ar-He [1] и криптона в смеси Kr-He [2]. В настоящее время в ИЛФИ ведутся работы, направленные на увеличение удельной мощности получаемой лазерной генерации, оптимизации разрядных условий и исследование кинетики процессов, происходящих в активной среде лазера.

Для получения лазерной генерации в ЛОНИГ используются возбужденные состояния атомов инертных газов, образующиеся при прохождении импульсно-периодического разряда длительностью  $40 \div 80$  нс, частотой повторения  $100 \div 200$  кГц и амплитудой напряжения  $800 \div 4000$  В [3–6].

Для дальнейшего развития, оптимизации и масштабирования ЛОНИГ была создана самосогласованная одномерная модель аргоно-гелиевой плазмы импульсного разряда постоянного тока и применена для исследования параметров Ar-He плазмы [3]. Кинетика созданной модели учитывает взаимодействие 23 энергетических состояний аргона и гелия, участвующих в 473 реакциях. В работе [4] модель была расширена для учета влияния примесного кислорода на аргоно-гелиевую плазму. В работе [5] кинетическая модель была применена для определения оптимальной концентрации инертных газов в смеси.

В настоящей работе проведено теоретическое исследование кинетических процессов, протекающих в аргоно-гелиевой плазме импульсного разряда. Определены главные процессы, влияющие на концентрацию частиц плазмы, и представлена графическая схема протекающих в аргоно-гелиевой плазме ключевых кинетических процессов.

# 1. Кинетическая модель аргоно-гелиевой плазмы

## 1.1. Частицы аргоно-гелиевой плазмы

В кинетику модели аргоно-гелиевой плазмы включено рассмотрение 11 энергетических состояний атомов аргона и гелия: атомы аргона Ar и гелия He в основном состоянии, атомы аргона Ar\* и гелия He\* в возбужденном состоянии, атомарные ионы аргона Ar<sup>+</sup> и гелия He<sup>+</sup>, гомоядерные ионы аргона Ar<sub>2</sub><sup>+</sup> и гелия He<sub>2</sub><sup>+</sup>, гетероядерный ион HeAr<sup>+</sup> и эксимерные молекулы аргона Ar<sub>2</sub><sup>\*</sup> и гелия He<sub>2</sub><sup>\*</sup>.

Под возбужденным атомом аргона Ar\* подразумевается усреднение энергетических уровней атома аргона –4s и –4p мультиплетов (в обозначениях Пашена). Под возбужденным атомом гелия подразумевается атом, возбужденный на нижний электронный уровень атома гелия He(<sup>3</sup>S<sub>1</sub>).

Значения энергии возбуждения и ионизации частиц аргоно-гелиевой плазмы представлены в таблице 1 [3].

Таблица 1

Энергия возбуждения и ионизации частиц аргоно-гелиевой плазмы

Частица	Ar*	He*	Ar <sup>+</sup>	He <sup>+</sup>	Ar <sub>2</sub> <sup>+</sup>	He <sub>2</sub> <sup>+</sup>	HeAr <sup>+</sup>	Ar <sub>2</sub> <sup>*</sup>	He <sub>2</sub> <sup>*</sup>
Энергия, эВ	11.55	19.8	15.76	24.59	14.5	22.23	15.74	11.06	17.97

Взаимодействие частиц в кинетическую модель введено путем добавления 64 реакций. Перечень данных реакций с указанием коэффициентов реакций представлен в таблице 2. Значения коэффициентов реакций приведены в м<sup>3</sup>/с для реакций с двумя взаимодействующими частицами и м<sup>6</sup>/с для реакций с тремя взаимодействующими частицами. Энергия электронов T<sub>e</sub> и температура атомов газа T<sub>f</sub> измеряются в эВ и К соответственно.

Полужирным шрифтом выделены ключевые реакции, оказывающие наибольшее влияние на концентрацию частиц аргоно-гелиевой плазмы. Обоснование выбора данных реакций представлено далее.

Таблица 2

Реакции взаимодействия частиц аргоно-гелиевой плазмы

№	Реакция	Коэффициент реакции, м <sup>3</sup> /с   м <sup>6</sup> /с
Электронный удар		
1	e + Ar → e + Ar	σ(ε) [6]
2	<b>e + Ar → 2e + Ar<sup>+</sup></b>	σ(ε) [6]
3	<b>e + Ar* → 2e + Ar<sup>+</sup></b>	σ(ε) [6]
4	<b>e + He → 2e + He<sup>+</sup></b>	σ(ε) [6]
5	e + He → e + He	σ(ε) [6]
6	<b>e + He* → 2e + He<sup>+</sup></b>	σ(ε) [6]
7–8	<b>e + He ↔ e + He*</b>	σ(ε) [6]
9–10	<b>e + Ar ↔ e + Ar*</b>	σ(ε) [6]

Рекомбинация		
11	$\text{Ar}^+ + 2\text{e} \rightarrow \text{Ar}^* + \text{e}$	$8.75 \times 10^{-39} \times T_e^{-4.5}$ [7, 8, 9, 10]
12	$\text{Ar}_2^+ + \text{e} \rightarrow \text{Ar}^* + \text{Ar}$	$9.8 \times 10^{-14} \times T_e^{-0.61}$ [7, 9, 10, 11, 12, 13]
13	$\text{HeAr}^+ + \text{e} \rightarrow \text{Ar}^* + \text{He}$	$9.8 \times 10^{-14} \times T_e^{-0.61}$ [9, 12, 13]
14	$\text{He}^+ + 2\text{e} \rightarrow \text{He}^* + \text{e}$	$5.1 \times 10^{-39} \times T_e^{-4.5}$ [9]
15	$\text{He}_2^+ + \text{e} \rightarrow \text{He}^* + \text{He}$	$5 \times 10^{-15} \times T_e^{-0.5}$ [9]
16	$\text{Ar}^+ + \text{e} + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar}^* + \text{Ar}$	$7.7 \times 10^{-49} \times T_r \times T_e^{-3.5}$ [9, 12]
17	$\text{Ar}^+ + \text{e} + \text{He} \rightarrow \text{Ar}^* + \text{He}$	$1.2 \times 10^{-47} \times T_r \times T_e^{-3.5}$ [9, 12]
18	$\text{He}^+ + \text{e} + \text{He} \rightarrow \text{He}^* + \text{He}$	$2.1 \times 10^{-47} \times T_r \times T_e^{-3.5}$ [9, 12]
19	$\text{He}^+ + \text{e} + \text{Ar} \rightarrow \text{He}^* + \text{Ar}$	$4.2 \times 10^{-48} \times T_r \times T_e^{-3.5}$ [9, 12]
Передача положительного заряда		
20	$\text{He}^+ + 2\text{He} \rightarrow \text{He}_2^+ + \text{He}$	$0.83 \times 10^{-43} \times \left(\frac{300}{T_r}\right)^{0.6}$ [9, 13, 14, 15, 16]
21	$\text{He}^+ + \text{Ar} + \text{He} \rightarrow \text{He}_2^+ + \text{Ar}$	$1.66 \times 10^{-43} \times \left(\frac{300}{T_r}\right)^{0.6}$ [9, 16]
22	$\text{He}^+ + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar}^+ + \text{He}$	$1 \times 10^{-18} \times \left(\frac{T_r}{300}\right)^{0.5}$ [9]
23	$\text{He}^+ + \text{Ar} + \text{Ar} \rightarrow \text{He} + \text{Ar}_2^+$	$1 \times 10^{-43} \times \left(\frac{300}{T_r}\right)^{0.5}$ [9]
24	$\text{He}_2^+ + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar}^+ + 2\text{He}$	$2.2 \times 10^{-16} \times \left(\frac{300}{T_r}\right)^{0.5}$ [9, 12, 13, 16]
25	$\text{Ar}^+ + \text{Ar} + \text{He} \rightarrow \text{Ar}_2^+ + \text{He}$	$1.13 \times 10^{-43} \times \left(\frac{300}{T_r}\right)^{0.4}$ [9, 16]
26	$\text{Ar}^+ + \text{Ar} + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar}_2^+ + \text{Ar}$	$2.25 \times 10^{-43} \times \left(\frac{300}{T_r}\right)^{0.4}$ [8, 9, 10, 13, 16, 17, 18]
27	$\text{Ar}^+ + \text{He} + \text{He} \rightarrow \text{HeAr}^+ + \text{He}$	$1 \times 10^{-44} \times \left(\frac{300}{T_r}\right)^{0.5}$ [9, 18]
28	$\text{Ar}^+ + \text{He} + \text{Ar} \rightarrow \text{HeAr}^+ + \text{Ar}$	$2.5 \times 10^{-44} \times \left(\frac{300}{T_r}\right)^{0.5}$ [9, 18]
29	$\text{He}^+ + \text{He} + \text{Ar} \rightarrow \text{HeAr}^+ + \text{He}$	$2.5 \times 10^{-44}$ [18]
30	$\text{Ar}_2^+ + \text{e} \rightarrow \text{Ar}^+ + \text{Ar} + \text{e}$	$1.36 \times 10^{-12} \times e^{\frac{2.06}{T_e}}$ [9]
31	$\text{Ar} + \text{Ar}_2^+ \rightarrow \text{Ar}^+ + 2\text{Ar}$	$6.06 \times 10^{-12} \times T_r^{-1} \times e^{\frac{-15130}{T_r}}$ [9]
32	$\text{He}_2^+ + \text{e} \rightarrow \text{He}^+ + \text{He} + \text{e}$	$1.06 \times 10^{-13} \times T_e^{-3} \times e^{\frac{-9.97}{T_e}}$ [9]
33	$\text{He}_2^+ + \text{He} \rightarrow \text{He}^+ + 2\text{He}$	$1.4 \times 10^{-12} \times T_r^{-0.67} \times e^{\frac{-28090}{T_r}}$ [9]
34	$\text{HeAr}^+ + \text{He} \rightarrow \text{Ar}^+ + \text{He} + \text{He}$	$1.17 \times 10^{-17} \times e^{\frac{-298}{T_r}} \times T_r^{0.5}$ [9]
35	$\text{HeAr}^+ + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar}^+ + \text{He} + \text{Ar}$	$2.94 \times 10^{-17} \times e^{\frac{-298}{T_r}} \times T_r^{0.5}$ [9]
Ионизация Пеннинга		
36	$\text{He}^* + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar}^+ + \text{He} + \text{e}$	$7.56 \times 10^{-17} \times \left(\frac{T_r}{300}\right)^{0.5}$ [9, 12, 16, 18]
37	$\text{Ar}^* + \text{Ar}^* \rightarrow \text{Ar}^+ + \text{Ar} + \text{e}$	$5 \times 10^{-16} \times \left(\frac{T_r}{300}\right)^{0.5}$ [9, 10]
38	$\text{Ar}^* + \text{Ar}^* \rightarrow \text{Ar}_2^+ + \text{e}$	$6 \times 10^{-16} \times \left(\frac{T_r}{300}\right)^{0.5}$ [19]

39	$\text{He}^* + \text{Ar} \rightarrow \text{HeAr}^+ + e$	$4.9 \times 10^{-17}$ [9]	
40	$\text{He}^* + \text{He}^* \rightarrow \text{He}^+ + \text{He} + e$	$1.5 \times 10^{-15} \times \left(\frac{T_r}{300}\right)^{0.5}$ [9]	
41	$\text{He}^* + \text{He}^* \rightarrow \text{He}_2^+ + e$	$1.5 \times 10^{-15}$ [12]	
Прилипание электрона			
42	$\text{He}_2^+ + e \rightarrow 2\text{He}$	$1 \times 10^{-14}$ [20]	
43	$\text{He}_2^+ + e + \text{He} \rightarrow 3\text{He}$	$2 \times 10^{-39}$ [20]	
44	$\text{He}_2^+ + 2e \rightarrow 2\text{He} + e$	$5 \times 10^{-39} \times T_e^{-4.5}$ [20]	
45	$\text{HeAr}^+ + e \rightarrow \text{Ar} + \text{He}$	$7.34 \times 10^{-15} \times T_e^{-0.67}$ [9]	
Образование и тушение эксимерных молекул аргона			
46	$\text{Ar}^* + \text{Ar} + \text{He} \rightarrow \text{Ar}_2^* + \text{He}$	$1.8 \times 10^{-43} \times T_r^{-0.6}$ [9]	
47	$\text{Ar}^* + \text{Ar} + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar}_2^* + \text{Ar}$	$3.6 \times 10^{-43} \times T_r^{-0.6}$ [9]	
48	$\text{Ar}_2^* \rightarrow 2\text{Ar} + h\nu$	$3.1 \times 10^5$ [9]	
49	$\text{Ar}_2^* + \text{He} \rightarrow 2\text{Ar} + \text{He}$	$2 \times 10^{-20}$ [12]	
50	$\text{Ar}_2^* + \text{Ar}_2^* \rightarrow \text{Ar}_2^+ + 2\text{Ar} + e$	$5 \times 10^{-16} \times \left(\frac{T_r}{300}\right)^{0.5}$ [9]	
51	$\text{Ar}_2^* + e \rightarrow \text{Ar}_2^+ + 2e$	$2 \times 10^{-13} \times e^{-\frac{6.2}{T_e}}$ [12]	
52	$\text{Ar}_2^* + e \rightarrow \text{Ar} + \text{Ar}^* + e$	$1 \times 10^{-14} \times e^{-\frac{1}{T_e}}$ [12]	
53	$\text{Ar}_2^* + \text{Ar}^* \rightarrow e + \text{Ar} + \text{Ar}_2^+$	$7 \times 10^{-16} \times \left(\frac{T_r}{300}\right)^{0.5}$ [12, 13]	
Образование и тушение эксимерных молекул гелия			
54	$\text{He}^* + \text{He} + \text{He} \rightarrow \text{He}_2^* + \text{He}$	$1.3 \times 10^{-45} \times \left(\frac{300}{T_r}\right)^{0.5}$ [9, 12, 20]	
55	$\text{He}^* + \text{He} + \text{Ar} \rightarrow \text{He}_2^* + \text{Ar}$	$2.6 \times 10^{-45} \times \left(\frac{300}{T_r}\right)^{0.5}$ [9, 12, 20]	
56	$\text{He}_2^* + \text{He}_2^* \rightarrow \text{He}_2^+ + 2\text{He} + e$	$1 \times 10^{-15} \times \left(\frac{T_r}{300}\right)^{0.5}$ [9, 15]	
57	$\text{He}_2^* + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar}^+ + 2\text{He} + e$	$3.1 \times 10^{-16} \times \left(\frac{T_r}{300}\right)^{0.5}$ [9, 12]	
58	$\text{He}_2^* + e \rightarrow \text{He}_2^+ + 2e$	$9.75 \times 10^{-16} \times e^{-\frac{3.4}{T_e}} \times T_e^{0.71}$ [9]	
59	$\text{He}_2^* + e \rightarrow 2\text{He} + e$	$3.8 \times 10^{-15}$ [9]	
Тушение возбужденных атомов аргона			
60	$\text{Ar}^* + \text{He} \rightarrow \text{Ar} + \text{He}$	$1 \times 10^{-20} \times \left(\frac{T_r}{300}\right)^{0.5}$ [12]	
61	$\text{Ar}^* + \text{Ar} \rightarrow 2\text{Ar}$	$3 \times 10^{-21} \times \left(\frac{T_r}{300}\right)^{0.5}$ [9]	
62	$\text{Ar}^* + \text{M} \rightarrow \text{Ar} + \text{M}$	M = O <sub>2</sub>	$2.1 \times 10^{-16}$ [15, 23]
		M = H <sub>2</sub> O	$7.8 \times 10^{-16}$ [22]
		M = CO <sub>2</sub>	$5.6 \times 10^{-16}$ [23]

		$M = N_2$	$3.5 \times 10^{-16}$ [23]
63	$Ar^* \rightarrow Ar + hv$		$1 \times 10^5$ [10]
64	$Ar^* + 2Ar \rightarrow 3Ar$		$2.25 \times 10^{-44} \times (\frac{T_r}{300})^{0.5}$ [19]

При известном сечении реакции  $\sigma(\epsilon)$  и функции распределения электронов по энергиям  $f(\epsilon)$  коэффициент реакции  $k$  определяется из соотношения

$$k = \sqrt{\frac{2q_e}{m_e}} \times \int_0^\infty \epsilon \times \sigma(\epsilon) \times f(\epsilon) d\epsilon, \quad (1)$$

где  $q_e$  и  $m_e$  – заряд и масса электрона.

Коэффициенты реакции взаимодействия с электронами, для которых неизвестны сечения реакции, записывались в форме уравнения Аррениуса

$$k = A \times T_e^n \times e^{\frac{-m}{T_e}}, \quad (2)$$

где  $T_e$  – средняя энергия электронов плазмы (эВ).

Коэффициенты реакции взаимодействия атомов и ионов записывались в форме

$$k = A \times T_r^n \times e^{\frac{-m}{T_r}}, \quad (3)$$

где  $T_r$  – температура тяжелых частиц плазмы (К). Значения  $n$  и  $m$  определяются экспериментально. Для большей части реакций значения  $n$  и  $m$  устанавливаются равными нулю, ввиду отсутствия экспериментальных данных и невозможности определить зависимость коэффициента реакции от температуры.

Для выявления реакций (таблица 2), оказывающих наибольшее влияние на концентрацию частиц аргоно-гелиевой плазмы (таблица 1), были проведены расчеты скоростей реакций – изменения количества вещества в единицу времени в единице объема. Скорость  $R_{ij}$  реакции между частицами  $i$  и  $j$  связана с коэффициентом реакции  $k_{ij}$  соотношением

$$R_{ij} = k_{ij} \times n_i \times n_j, \quad (4)$$

где  $n_i$  и  $n_j$  – концентрации взаимодействующих частиц.

## 1.2. Параметры расчета

Активной средой ЛОНИГ является плазма инертных газов, инициированная импульсно-периодическим разрядом. На рис. 1 представлены значения напряжения в разряде, вводимые в качестве начальных параметров расчета. Длительность разрядного импульса 40 нс по полувысоте, амплитуда напряжения 1000 В и частота повторения импульсов 100 кГц. Параметры разряда выбраны в соответствии с экспериментальными значениями.

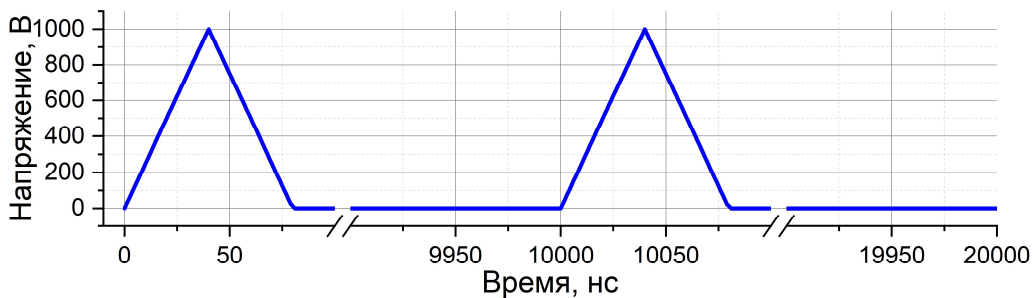


Рис. 1. Значения напряжения в разряде в различные моменты времени

При проведении расчетов устанавливались параметры, близкие к экспериментальным [1]:

- Температура нейтральных частиц и ионов – 300 К
- Давление газа – 1 атм
- Смесь аргона и гелия – 2 % аргона и 98 % гелия
- Расстояние между электродами – 3 мм

## 2. Взаимодействие частиц аргоно-гелиевой плазмы

### 2.1. Взаимодействие ионов

#### 2.1.1. Атомарные ионы аргона $Ar^+$

Во время прохождения разряда атомы аргона ионизируются преимущественно при столкновениях с электронами из основного (таблица 2, реакция № 2) или возбужденного (реакция № 23) состояний и при ионизации Пеннинга (реакция № 36). После прохождения разряда увеличение концентрации ионов аргона  $Ar^+$  происходит при передаче заряда от иона  $HeAr^+$  (реакция № 34).

На рис. 2 представлены значения скоростей реакций увеличения и уменьшения ионов аргона, рассчитанные с помощью кинетической модели для промежутка времени 1000 нс после начала разряда.

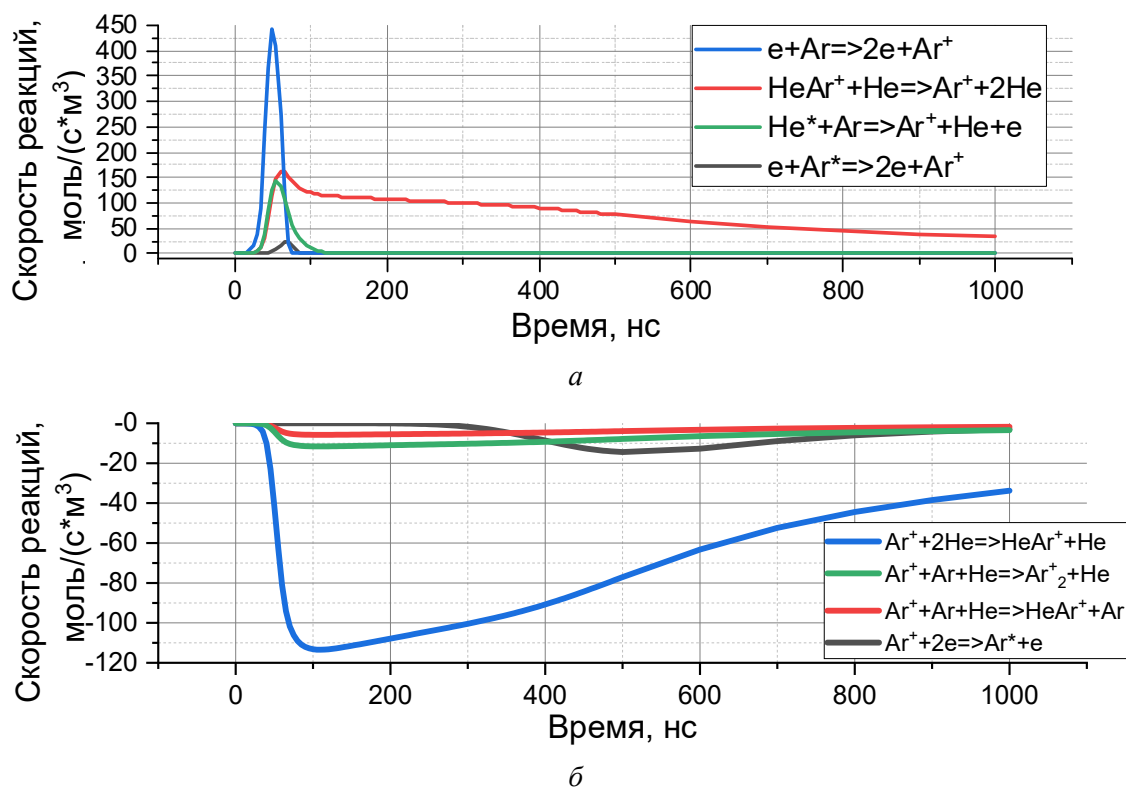
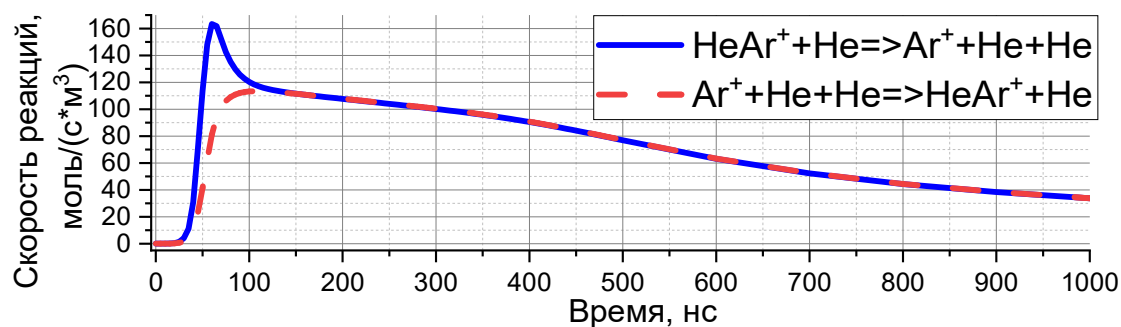


Рис. 2. Скорости реакций увеличения (а) и уменьшения (б) концентрации ионов  $Ar^+$

Уменьшение концентрации атомарных ионов аргона происходит преимущественно при образовании гетероядерного иона  $HeAr^+$  (реакция № 27, № 28), при образовании гомоядерного иона  $Ar^+_2$  (реакция № 25) и при ионно-электронной рекомбинации (реакция № 11).

Значения энергии ионизации при образовании атомарного иона аргона  $Ar^+$  и гетероядерного иона  $HeAr^+$  отличаются на  $\Delta\varepsilon = 0.02$  эВ, из-за чего данные ионы находятся в постоянном взаимообмене.

На рис. 3 показано сравнение скоростей реакций  $HeAr^+ \rightarrow Ar^+$  и  $Ar^+ \rightarrow HeAr^+$  в промежутке времени 1000 нс после начала разряда.


 Рис. 3. Скорости реакций  $\text{HeAr}^+ \rightarrow \text{Ar}^+$  и  $\text{Ar}^+ \rightarrow \text{HeAr}^+$ 

После прохождения разрядного импульса скорости передачи заряда в реакциях  $\text{HeAr}^+ \rightarrow \text{Ar}^+$  (реакция № 34) и  $\text{Ar}^+ \rightarrow \text{HeAr}^+$  (реакция № 27) отличаются не более, чем на 1 %. Концентрация ионов  $\text{Ar}^+$  уменьшается преимущественно при образовании гомоядерных ионов  $\text{Ar}_2^+$  (реакция № 25, № 26) и при электронно-ионной рекомбинации с образованием  $\text{Ar}^*$  (реакция № 11).

После прохождения разряда концентрация возбужденных атомов аргона  $\text{Ar}^*$  увеличивается при протекании электронно-ионной рекомбинации (реакция № 11). В таблице 3 приведены значения коэффициентов электронно-ионной рекомбинации аргона из различных источников и значения максимальной концентрации возбужденных атомов аргона и электронов, рассчитанные при использовании данных констант. Полужирным шрифтом выделено значение коэффициента реакции, примененное в данной работе в качестве достоверного.

Таблица 3

**Значения максимальной концентрации атомов аргона и электронов, рассчитанные для различных коэффициентов электронно-ионной рекомбинации ионов  $\text{Ar}^+$**

Коэффициент рекомбинации, $\frac{\text{м}^6}{\text{с}}$ $\text{Ar}^+ + 2e \rightarrow \text{Ar}^* + e$	Максимальная концентрация возбужденных атомов аргона, $10^{13} \text{ см}^{-3}$	Максимальная концентрация электронов, $10^{13} \text{ см}^{-3}$
$2 \times 10^{-39} \times T_e^{-4.5}$ [7, 8]	2.6	1.08
<b><math>8.75 \times 10^{-39} \times T_e^{-4.5}</math></b> [10]	2.33	0.97
$7.2 \times 10^{-39} \times T_e^{-4.5}$ [9]	2.31	0.96

Применение в кинетической модели коэффициентов реакций рекомбинации ионов  $\text{Ar}^+$  из различных источников приводит к получению результатов расчета, отличающихся не более чем на 10 %.

Дополнительно следует заметить, что коэффициенты реакций рекомбинации при соударении иона аргона с электроном и нейтральным атомом (реакции № 16, № 17) отличаются на несколько порядков для различных источников. В таблице 4 приведены значения коэффициентов данных реакций и результаты расчетов максимальной концентрации электронов и возбужденных атомов аргона при использовании различных коэффициентов реакций. Полужирным шрифтом выделены значения, примененные в данной работе в качестве достоверных.

Различие между значениями концентрации возбужденных атомов аргона составляет 11 % при использовании коэффициентов реакции  $\text{Ar}^+ + e + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar}^* + \text{Ar}$  из различных источников. Данная реакция не оказывает заметного влияния на результаты расчета, поэтому проблема выбора достоверного значения коэффициента второстепенна. Вопрос о выборе коэффициента данной реакции остается открытым.

Таблица 4

Значения максимальной концентрации возбужденных атомов аргона и электронов, рассчитанные для различных коэффициентов электронно-ионной рекомбинации ионов  $Ar^+$  при тройных соударениях с электроном и нейтральным атомом

Реакция	Коэффициент рекомбинации, $\frac{m^6}{c}$	Максимальная концентрация возбужденных атомов аргона, $10^{13} \text{ cm}^{-3}$	Максимальная концентрация электронов, $10^{12} \text{ cm}^{-3}$
$Ar^+ + e + Ar \rightarrow Ar^* + Ar$	$7.7 \times 10^{-49} \times T_r \times T_e^{-3.5}$ [12]	2.33	9.7
	$1.1 \times 10^{-42} \times T_e^{-2.5}$ [9]	2.06	8.5
$Ar^+ + e + He \rightarrow Ar^* + He$	$1.2 \times 10^{-47} \times T_r \times T_e^{-3.5}$ [12]	2.33	9.7
	$1.1 \times 10^{-42} \times T_e^{-2.5}$ [9]	2.29	9.5

### 2.1.2. Молекулярные ионы аргона $Ar_2^+$

Увеличение концентрации гомоядерных ионов  $Ar_2^+$  происходит при передаче заряда от ионов  $Ar^+$  в тройных столкновениях с атомами аргона (реакция № 26) или гелия (реакция № 25) и при ионизации Пеннинга (реакция № 38).

На рис. 4 представлены значения скоростей реакций увеличения и уменьшения концентрации ионов  $Ar_2^+$ , рассчитанные для промежутка времени 10000 нс после начала разряда.

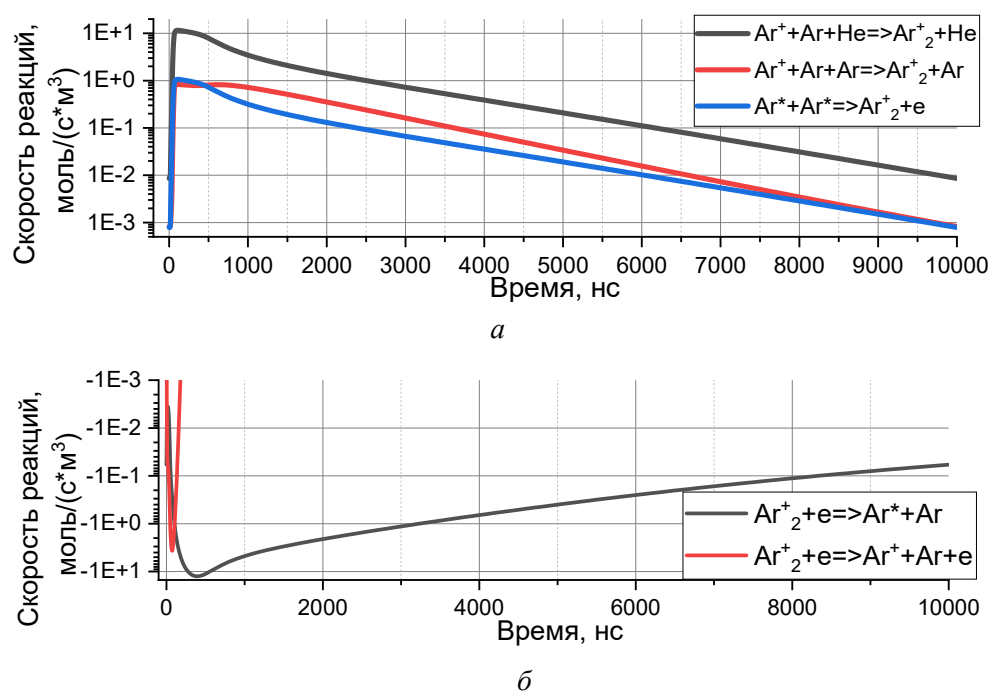


Рис. 4. Скорости реакций увеличения (a) и уменьшения (b) концентрации ионов  $Ar_2^+$

Уменьшение концентрации ионов  $Ar_2^+$  происходит при передаче заряда атомарным ионам  $Ar^+$  (реакция № 30) во время прохождения разряда и при диссоциативной рекомбинации (реакция № 12) после прохождения разряда.

После прохождения разряда концентрация возбужденных атомов аргона  $Ar^*$  восполняется при протекании диссоциативной рекомбинации (реакция № 12). В таблице 5 приведены значения коэффициентов диссоциативной рекомбинации аргона из различных источников и

значения максимальной концентрации возбужденных атомов аргона и электронов, получаемые при проведении расчета для каждого коэффициента. Полужирным шрифтом выделено значение коэффициента, примененное в данной работе в качестве достоверного.

Таблица 5

**Значения максимальной концентрации атомов аргона и электронов, рассчитанные для различных значений коэффициентов диссоциативной рекомбинации ионов  $Ar_2^+$**

Коэффициент рекомбинации, $\frac{m^3}{c}$ $Ar_2^+ + e \rightarrow Ar^* + Ar$	Максимальная концентрация возбужденных атомов аргона, $10^{13} \text{ см}^{-3}$	Максимальная концентрация электронов, $10^{12} \text{ см}^{-3}$
$9.1 \times 10^{-14} \times T_e^{-0.67}$ [11]	2.08	8.58
<b><math>9.8 \times 10^{-14} \times T_e^{-0.61}</math></b> [12]	2.33	9.66
$6 \times 10^{-14} \times T_e^{-0.67}$ [13]	2.94	12.3
$1.62 \times 10^{-13} \times \left(\frac{T_e}{0.0265}\right)^{-0.64} \times \left(\frac{T_r}{300}\right)^{-0.86}$ [10]	9.3	43
$1 \times 10^{-14} \times T_e^{-0.6} \times \left(\frac{T_r}{300}\right)^{-0.6}$ [7]	15.7	80

Использование в модели коэффициентов реакций рекомбинации ионов  $Ar_2^+$  из различных источников приводит к отличию результатов расчета в несколько раз. Выделенное полужирным шрифтом в таблице 5 значение было применено в модели как приводящее к наиболее достоверному результату в соответствии с экспериментальными данными [5].

На рис. 5 представлены значения концентрации ионов аргона  $Ar^+$  и  $Ar_2^+$ , рассчитанные в течение разрядного периода с помощью расчетной модели.

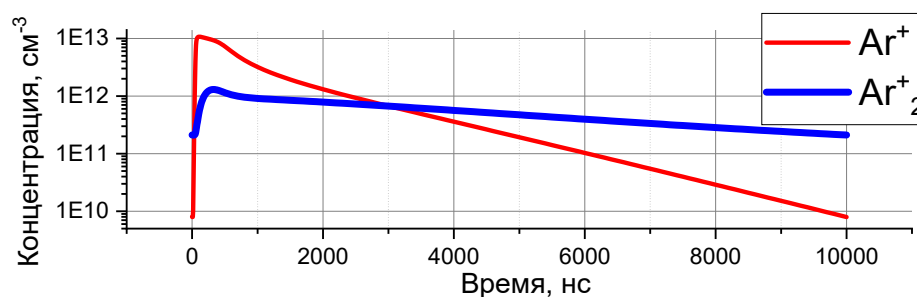


Рис. 5. Значения концентрации ионов аргона  $Ar_2^+$

После разряда концентрация ионов  $Ar^+$  стремительно уменьшается путем передачи положительного заряда гомоядерным ионам  $Ar_2^+$ . После трети периода положительный заряд плазмы содержится преимущественно в ионах  $Ar_2^+$ .

### 2.1.3. Ион $HeAr^+$

Увеличение концентрации ионов  $HeAr^+$  происходит при ионизации Пеннинга (табл. 2, № 39) во время прохождения разряда и при передаче заряда от ионов аргона  $Ar^+$  в тройных столкновениях с атомами гелия (реакция № 27) и аргона (реакция № 28) после прохождения разряда.

На рис. 6 представлены значения скоростей реакций увеличения и уменьшения концентрации ионов  $HeAr^+$ .

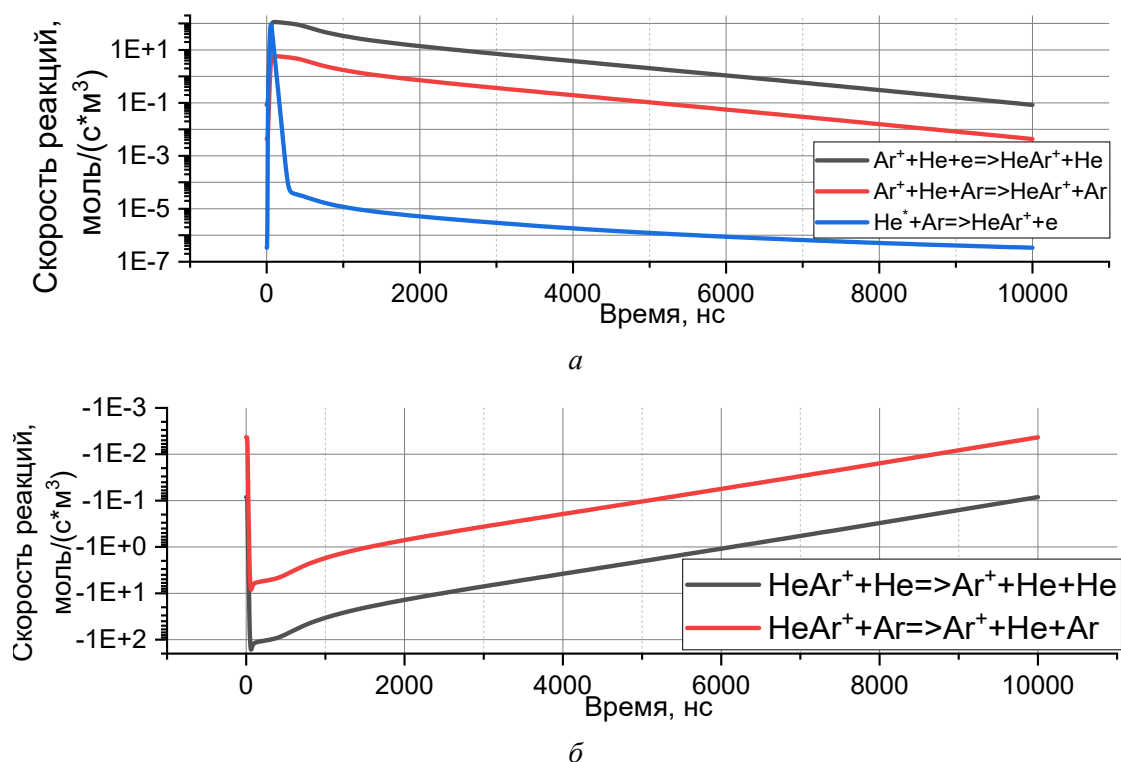


Рис. 6. Скорости реакций увеличения (а) и уменьшения (б) концентрации ионов HeAr<sup>+</sup>

Уменьшение концентрации ионов HeAr<sup>+</sup> происходит при передаче заряда ионам аргона Ar<sup>+</sup> в столкновениях с атомами аргона (реакция № 34) и гелия (реакция № 35).

В таблице 6 приведены значения коэффициентов диссоциативной рекомбинации ионов HeAr<sup>+</sup> (реакция № 13) из различных источников и значения максимальной концентрации возбужденных атомов аргона и электронов, рассчитанные при использовании данных значений. Полужирным шрифтом выделено значение коэффициента реакции, примененное в данной работе в качестве достоверного.

Таблица 6

**Значения максимальной концентрации атомов аргона и электронов, рассчитанные для различных значений коэффициентов диссоциативной рекомбинации иона HeAr<sup>+</sup>**

Коэффициент рекомбинации, $\frac{m^3}{c \cdot s}$	Максимальная концентрация возбужденных атомов аргона, $10^{13} \text{ cm}^{-3}$	Максимальная концентрация электронов, $10^{12} \text{ cm}^{-3}$
HeAr <sup>+</sup> + e → Ar <sup>*</sup> + He		
$9.8 \times 10^{-14} \times T_e^{-0.61}$ [12]	2.33	9.66
<b><math>7.34 \times 10^{-15} \times T_e^{-0.67}</math> [9]</b>	2.33	9.65
$7 \times 10^{-16} \times T_e^{-0.5}$ [13]	2.30	9.51

Применение в кинетической модели коэффициентов реакции рекомбинации ионов HeAr<sup>+</sup> из различных источников приводит к изменению результатов расчета не более, чем на 2 %.

На рис. 7 представлены значения концентрации ионов аргона Ar<sup>+</sup> и HeAr<sup>+</sup>, рассчитанные для промежутка времени 10000 нс после начала разряда.

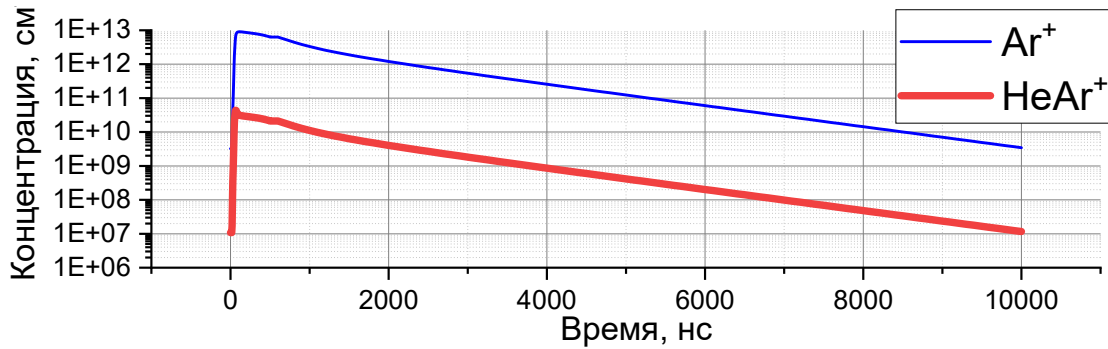
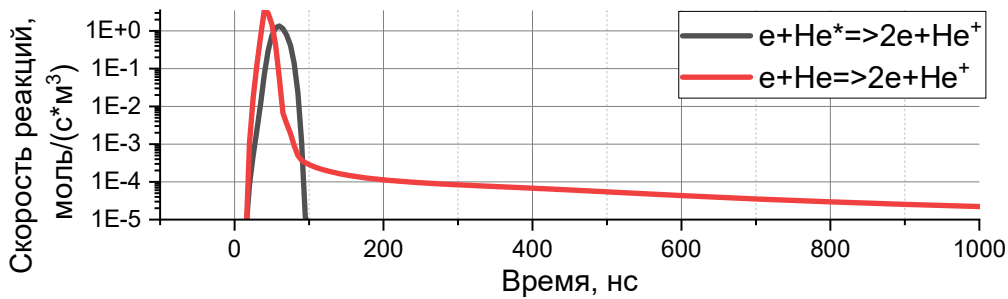


Рис. 7. Значения концентрации ионов аргона  $\text{HeAr}^+$

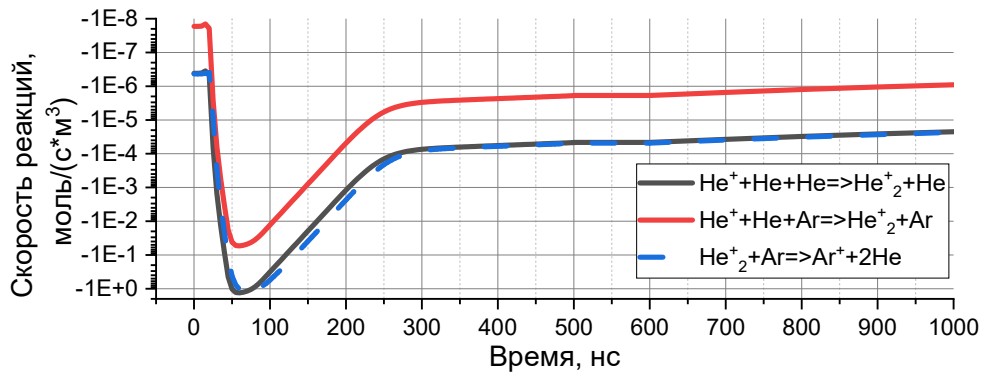
### 2.1.4. Атомарные ионы гелия $\text{He}^+$ и молекулярные ионы гелия $\text{He}_2^+$

При прохождении разряда атомы гелия ионизируются электронным ударом из основного (реакция № 4) или возбужденного состояния (реакция № 6).

На рис. 8 представлены значения скоростей увеличения и уменьшения концентрации ионов  $\text{He}^+$  и  $\text{He}_2^+$ , рассчитанные для промежутка времени 1000 нс после начала прохождения разряда.



а



б

Рис. 8. Значения скоростей увеличения и уменьшения концентрации ионов  $\text{He}^+$ (а) и  $\text{He}_2^+$  (а, б) электронным ударом

После прохождения разряда атомарные ионы гелия  $\text{He}^+$  передают заряд молекулярным ионам гелия  $\text{He}_2^+$  в тройных соударениях с атомами гелия (реакция № 20) или аргона (реакция № 21). Эти реакции являются ключевыми при образовании молекулярных атомов гелия  $\text{He}_2^+$ . Распад молекулярных атомов гелия  $\text{He}_2^+$  происходит при столкновении с атомом аргона и образовании атомарного иона аргона  $\text{Ar}^+$  (реакция № 24).

На рис. 9 представлены значения концентрации ионов гелия  $\text{He}^+$  и  $\text{He}_2^+$ , рассчитанные в течение разрядного периода с помощью расчетной модели.

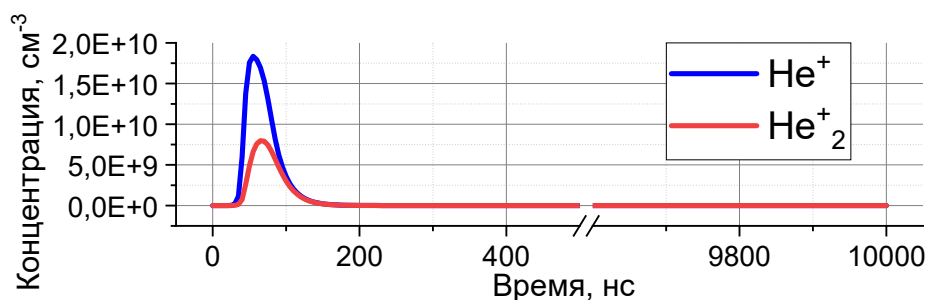


Рис. 9. Значения концентрации ионов гелия  $\text{He}^+$  и  $\text{He}_2^+$

Коэффициенты реакций рекомбинации при тройном соударении иона гелия с электроном и нейтральным атомом (реакции № 18, № 9) отличаются на несколько порядков для различных источников. В таблице 7 приведены значения коэффициентов данных реакций и результаты расчетов максимальной концентрации электронов и возбужденных атомов аргона при использовании различных коэффициентов реакций. Полужирным шрифтом выделены значения, примененные в данной работе.

Таблица 7

**Значения максимальной концентрации атомов аргона и электронов, рассчитанные для различных значений коэффициентов электронно-ионной рекомбинации ионов  $\text{He}^+$  при тройных соударениях с электроном и нейтральным атомом**

Реакция	Коэффициент рекомбинации, $\frac{\text{м}^6}{\text{с}}$	Максимальная концентрация возбужденных атомов аргона, $10^{13} \text{ см}^{-3}$	Максимальная концентрация электронов, $10^{12} \text{ см}^{-3}$
$\text{He}^+ + e + \text{He} \rightarrow \text{He}^* + \text{He}$	<b><math>2.1 \times 10^{-47} \times T_r \times T_e^{-3.5}</math></b> [12]	2.33	9.7
	$1.1 \times 10^{-42} \times T_e^{-2.5}$ [9]	2.32	9.6
$\text{He}^+ + e + \text{Ar} \rightarrow \text{He}^* + \text{Ar}$	<b><math>4.2 \times 10^{-48} \times T_r \times T_e^{-3.5}</math></b> [12]	2.33	9.7
	$1.1 \times 10^{-42} \times T_e^{-2.5}$ [9]	2.29	9.5

Различие между значениями концентрации ионов гелия при использовании различных коэффициентов реакций рекомбинации (реакции № 18, № 19) составляет не более 1 %.

## 2.2. Электроны

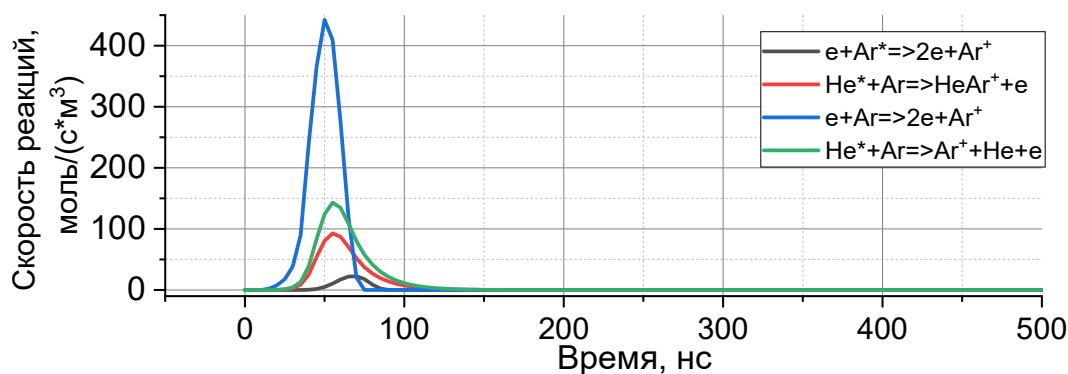
Увеличение концентрации электронов происходит при протекании четырех реакций – ионизация атома аргона в основном состоянии электронным ударом (реакция № 2), ионизация возбужденного атома аргона электронным ударом (реакция № 3), ионизация Пеннинга с образованием иона  $\text{Ar}^+$  (реакция № 36) или иона  $\text{HeAr}^+$  (реакция № 39). Влияние остальных реакций на концентрацию электронов в плазме незначительно.

На рис. 10 представлены значения скоростей реакций увеличения и уменьшения концентрации электронов.

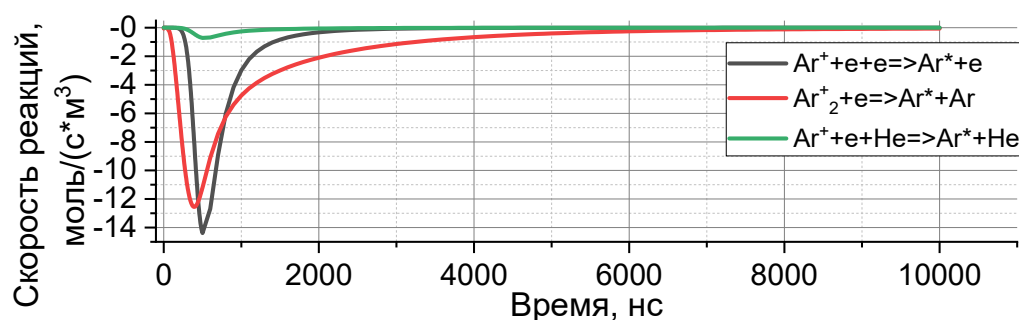
Уменьшение концентрации электронов происходит при рекомбинации атомарных ионов  $\text{Ar}^+$  (реакции № 11, 17) и гомоядерных ионов  $\text{Ar}_2^+$  (реакция № 12).

На рис. 11 представлены значения концентрации и средней энергии электронов, рассчитанные в течение разрядного периода с помощью модели.

Плазма импульсно-периодического разряда является полностью термодинамически неравновесной, ввиду чего энергии электронов и ионов отличаются в сотни раз. Для расчета энергии электронов в кинетической модели производится решение уравнения Больцмана.

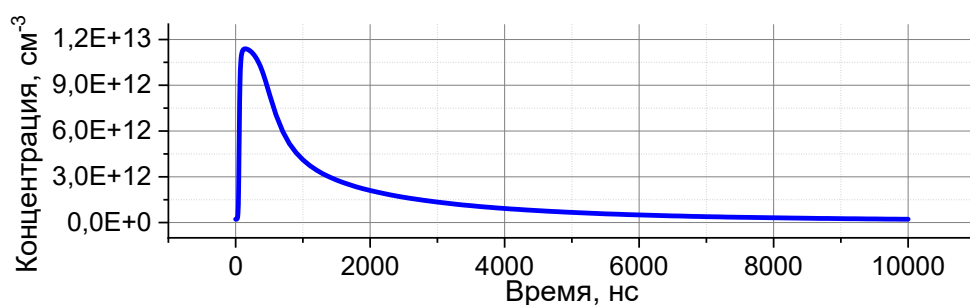


*a*

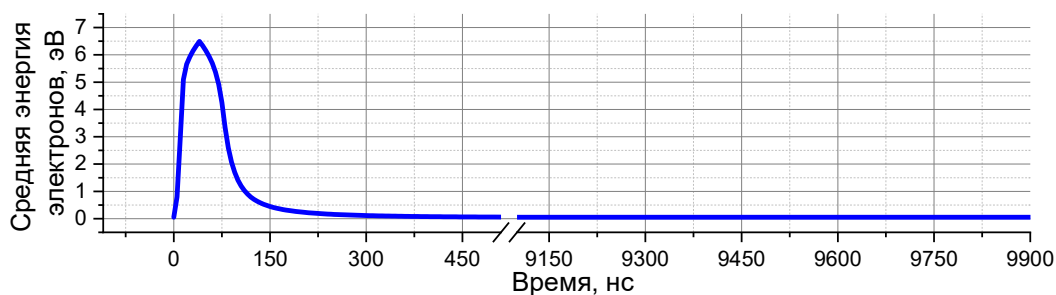


*б*

Рис. 10. Скорости реакций увеличения (*a*) и уменьшения (*б*) концентрации электронов



*a*



*б*

Рис. 11. Значения концентрации (*a*) и средней энергии (*б*) электронов

Максимальное значение энергии электронов достигалось в момент приложения максимального напряжения и в проведенных расчетах равнялось 6.5 эВ. В течение 1 мкс после прохождения разряда средняя энергия электронов уменьшается до 52 мэВ и остается неизменной до прохождения следующего разрядного импульса. После прохождения разряда концентрация и энергия электронов поддерживается ионизацией Пеннинга (реакции № 36–41).

Ввиду этого, энергия электронов остается выше энергии ионов и нейтральных частиц (~ 35 мэВ).

Температура ионов и нейтральных частиц считается одинаковой.

## 2.3. Взаимодействие нейтральных частиц

### 2.3.1. Возбужденные атомы аргона $Ar^*$

Во время разряда атомы аргона возбуждаются преимущественно при соударении с электронами (реакция № 9). После прохождения разряда возбуждение атомов происходит при электронно-ионной рекомбинации атомарных ионов  $Ar^+$  (реакция № 11) и диссоциативной рекомбинации гомоядерных ионов  $Ar_2^+$  (реакция № 12). Влияние остальных реакций на концентрацию возбужденных атомов незначительно.

На рис. 12 представлены значения скоростей реакций возбуждения и тушения атомов аргона.

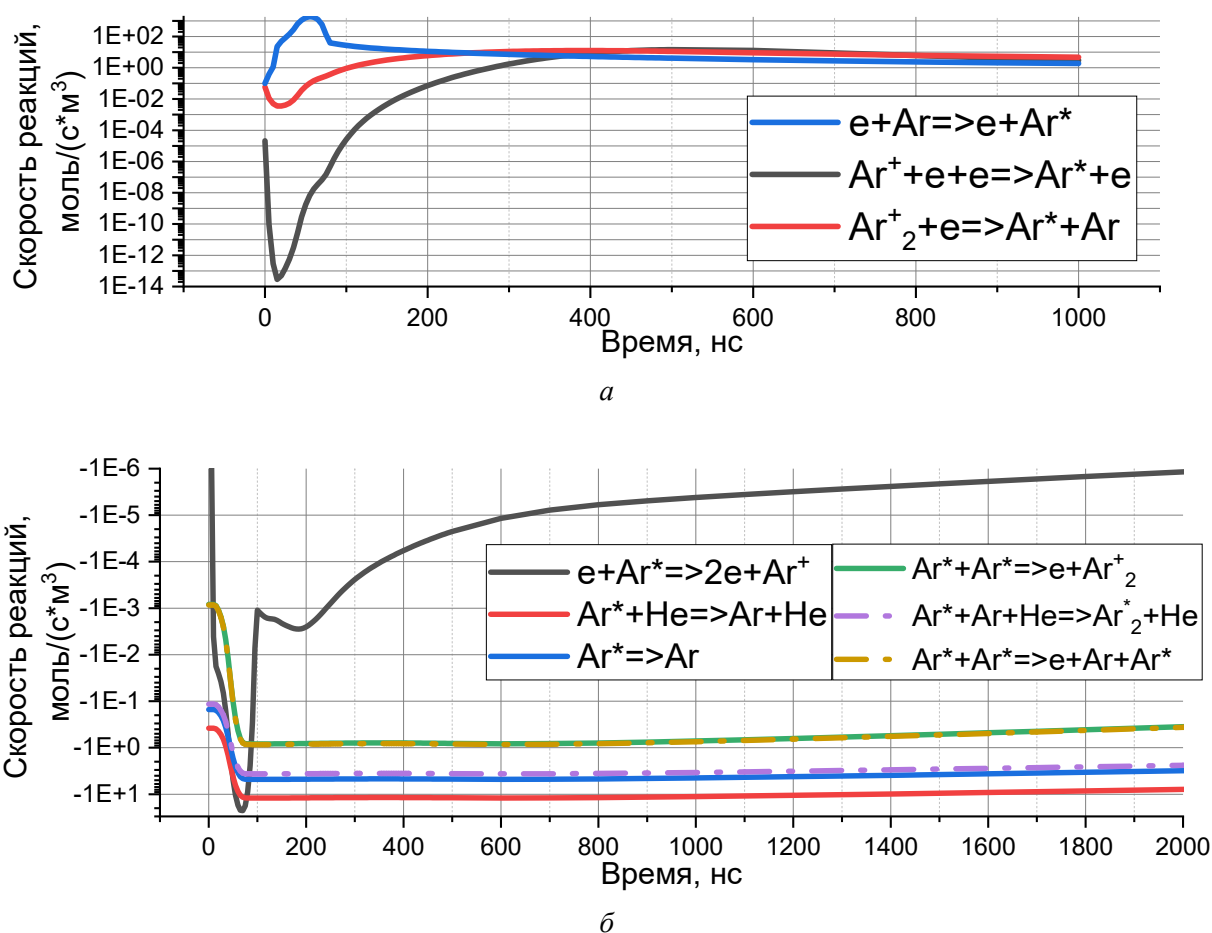


Рис. 12. Скорости возбуждения (а) и тушения (б) атомов аргона

Тушение возбужденных атомов аргона в чистой газовой смеси во время разряда происходит при ступенчатой ионизации (реакция № 3). После прохождения разряда тушение происходит при столкновениях с атомами гелия (реакция № 60), при спонтанном испускании фотона (реакция № 63) и при образовании эксимерных молекул (реакция № 46). Дополнительно влияние оказывает ионизация Пеннинга с образованием атомарного иона аргона (реакция № 37) и гомоядерного иона аргона (реакция № 38).

В активной среде, содержащей примесные газы (кислород, азот, углекислый газ, водяной пар и др.), тушение преимущественно происходит при столкновениях возбужденных атомов аргона с молекулами примесей (реакция № 62). В работе [4] показано, что влияние

атомов кислорода на тушение возбужденных атомов становится заметным при доле кислорода в активной среде, равной  $1 \times 10^{-4}$  или более. При доле кислорода, равной  $2 \times 10^{-4}$ , происходит тушение приблизительно половины метастабильных атомов аргона. В данной работе рассматривается газовая смесь, состоящая из компонентов высокой степени очистки с концентрацией примесей, не превышающей  $2 \times 10^{-6}$ .

На рис. 13 представлены значения концентрации возбужденных атомов аргона  $\text{Ar}^*$ , рассчитанные в течение разрядного периода с помощью расчетной модели.

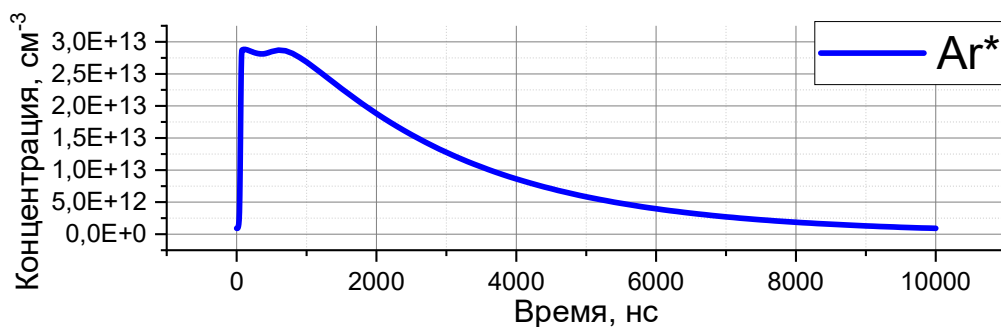


Рис. 13. Концентрация возбужденных атомов аргона  $\text{Ar}^*$

### 2.3.2. Возбужденные атомы гелия $\text{He}^*$

При прохождении разряда атомы гелия возбуждаются электронным ударом (реакция № 7). Влияние остальных реакций на увеличение концентрации  $\text{He}^*$  незначительно.

Тушение возбужденных атомов гелия  $\text{He}^*$  происходит при ионизации Пеннинга с образованием ионов  $\text{Ar}^+$  (реакция № 36) или  $\text{HeAr}^+$  (реакция № 39).

На рис. 14 представлены значения скоростей реакций увеличения и уменьшения концентрации возбужденных атомов гелия  $\text{He}^*$ , рассчитанные для промежутка времени 1000 нс после начала разряда.

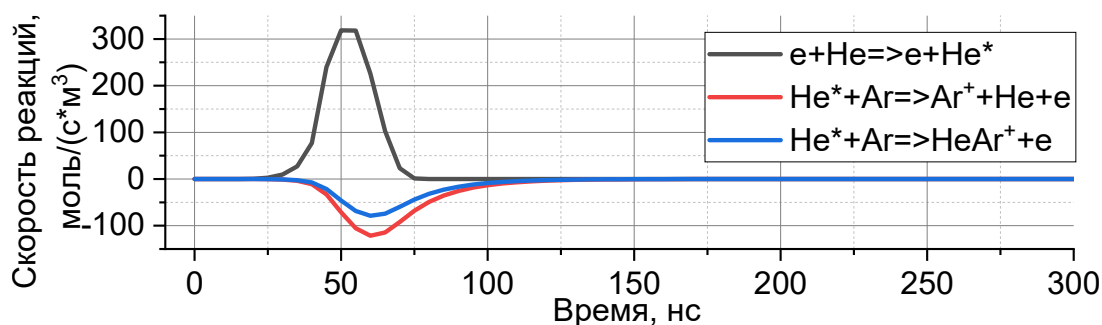


Рис. 14. Скорости реакций увеличения и уменьшения концентрации возбужденных атомов гелия  $\text{He}^*$

Ионизация Пеннинга (реакция № 36) является важным процессом при ионизации атомов аргона и увеличении проводимости плазмы. В таблице 8 приведены значения коэффициентов данной реакции из различных источников и значения максимальной концентрации возбужденных атомов аргона и электронов, рассчитанные при использовании данных значений. Полужирным шрифтом выделено значение коэффициентов реакции, примененное в данной работе в качестве достоверных.

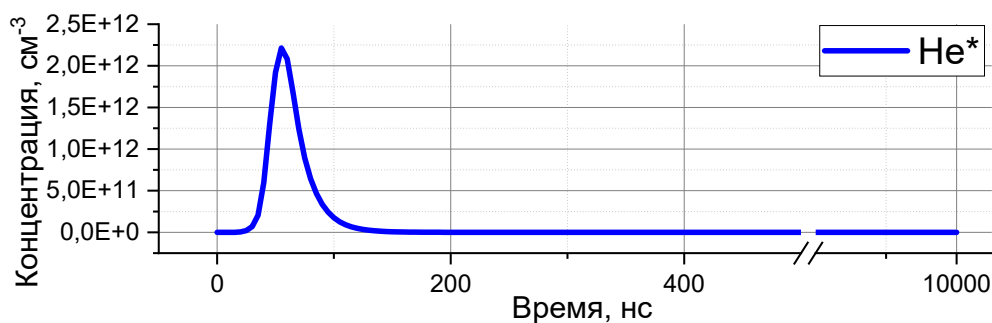
Результаты расчета, рассчитанные для различных значений коэффициентов ионизации Пеннинга (см. таблица 2, № 36), отличаются не более чем на 50 %. Выделенное полужирным шрифтом в таблице 8 значение было применено в модели как приводящее к наиболее достоверному результату в соответствии с экспериментальными данными [5].

Таблица 8

**Значения максимальной концентрации атомов аргона и электронов, рассчитанные для различных значений коэффициентов ионизации Пеннинга  $\text{He}^* \rightarrow \text{Ar}^+$**

Коэффициент ионизации, $\frac{\text{м}^3}{\text{с}}$ $\text{He}^* + \text{Ar} \rightarrow \text{Ar}^+ + \text{He} + e$	Максимальная концентрация возбужденных атомов аргона, $10^{13} \text{ см}^{-3}$	Максимальная концентрация электронов, $10^{12} \text{ см}^{-3}$
$2.07 \times 10^{-16} \times e^{-\frac{684}{T_r}} [18]$	1.83	7.7
$2.2 \times 10^{-17} [9]$	1.86	7.9
$7.56 \times 10^{-17} \times \left(\frac{T_r}{300}\right)^{0.5} [12]$	2.33	9.66
$1.3 \times 10^{-16} \times \frac{T_r}{300} [16]$	2.72	11.6

На рис. 15 представлены значения концентрации возбужденных атомов гелия  $\text{He}^*$ , рассчитанные в течение разрядного периода с помощью расчетной модели.

Рис. 15. Значения концентрации возбужденных атомов гелия  $\text{He}^*$ 

### 2.3.3. Эксимеры аргона $\text{Ar}_2^*$ и гелия $\text{He}_2^*$

Образование эксимерных молекул аргона  $\text{Ar}_2^*$  происходит при тройных соударениях возбужденного атома аргона  $\text{Ar}^*$  с атомами гелия (реакция № 46) или аргона (реакция № 47), находящихся в основном состоянии. Данные реакции являются одним из ключевых каналов тушения возбужденных атомов аргона  $\text{Ar}^*$ .

Тушение эксимера  $\text{Ar}_2^*$  преимущественно происходит при соударении с атомом гелия и распаде на невозбужденные атомы аргона (реакция № 49) и при испускании фотона (реакция № 48). Влияние других каналов тушения пренебрежимо мало.

На рис. 16 представлены значения скоростей реакций увеличения и уменьшения концентрации эксимерных молекул аргона  $\text{Ar}_2^*$  и гелия  $\text{He}_2^*$ . Скорости реакции уменьшения изображены пунктирными линиями.

Образование эксимерных молекул гелия  $\text{He}_2^*$  происходит при тройных соударениях возбужденного атома гелия с атомами аргона (реакция №55) или гелия (реакция №54). Тушение эксимерных молекул гелия  $\text{He}_2^*$  происходит преимущественно при соударении с атомом аргона и образовании иона  $\text{Ar}^+$  (реакция №57). Влияние других каналов тушения пренебрежимо мало.

На рис. 17 представлены значения концентрации эксимеров аргона  $\text{Ar}_2^*$  и гелия  $\text{He}_2^*$ , рассчитанные в течение разрядного периода с помощью расчетной модели. Значения представлены в сравнении с концентрацией возбужденных атомов аргона.

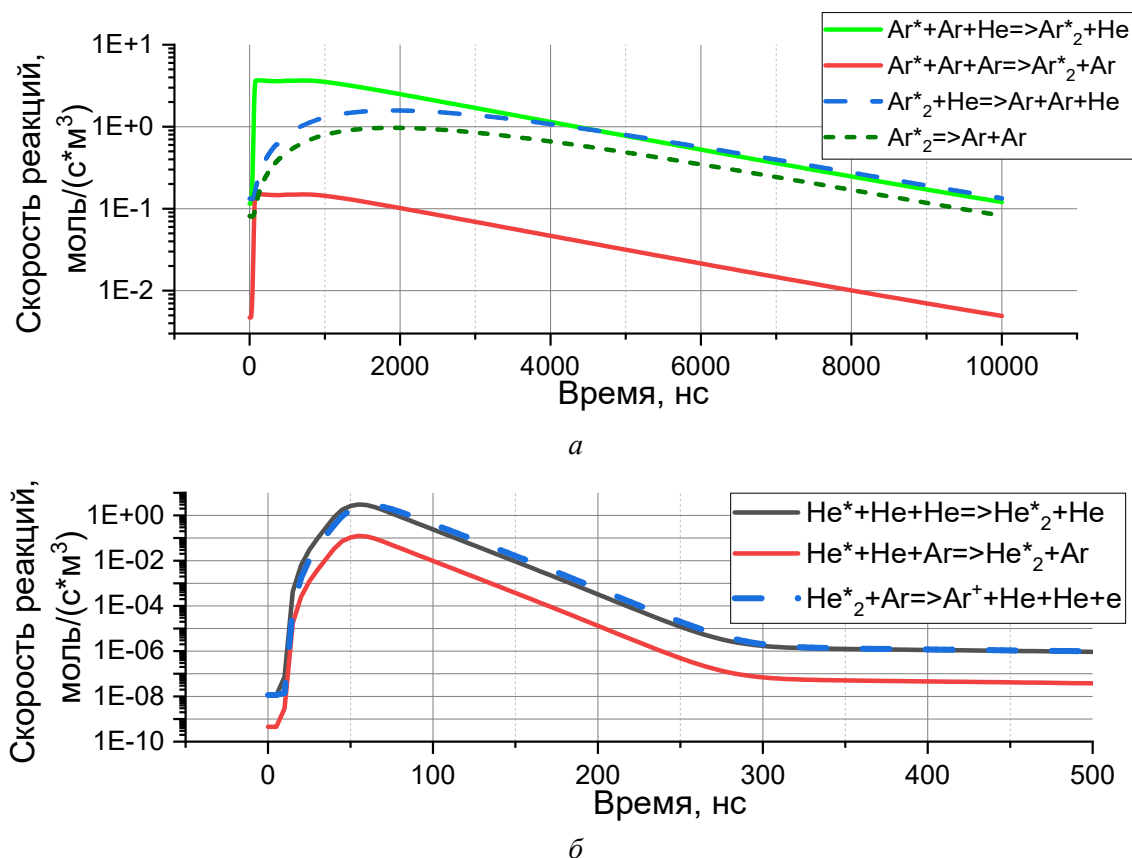


Рис. 16. Скорости реакций увеличения и уменьшения концентрации эксимерных молекул аргона (а) и гелия (б)

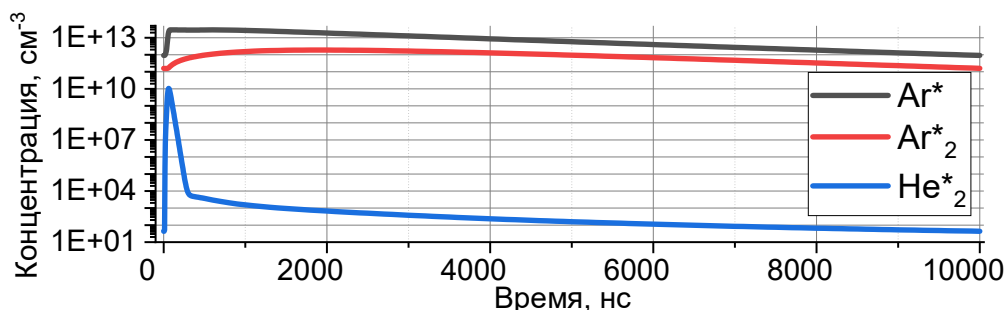


Рис. 17. Значения концентрации эксимеров аргона Ar\*<sub>2</sub> и гелия He\*<sub>2</sub>

### 3. Упрощение модели

#### 3.1. Влияние различных реакций аргоно-гелиевой плазмы на результаты расчета

Проведенные расчеты выявили наличие в кинетике созданной модели аргоно-гелиевой плазмы реакций, не оказывающих заметного влияния на возбуждение или тушение частиц. Возможность исключения данных реакций из кинетической модели была проверена путем проведения ряда вычислений концентрации возбужденных атомов аргона и концентрации электронов. В каждом из проведенных расчетов одна из реакций исключалась из полной кинетической модели для исследования влияния данной реакции на результаты расчета.

В таблице 9 представлены значения максимальной концентрации возбужденных атомов аргона и электронов для моделей с исключенными реакциями. Номера реакций указаны в соответствии с таблицей 2.

Таблица 9

**Значения максимальной концентрации возбужденных атомов аргона и электронов для моделей с исключенными реакциями**

№	Исключенная реакция	Концентрация возбужденных атомов аргона $Ar^*$ , $10^{13} \text{ см}^{-3}$	Концентрация электронов $e$ , $10^{12} \text{ см}^{-3}$	Отличие от полной модели, %	
				$Ar^*$	$e$
	Полная модель	2.89	1.14	0	0
14	$He^+ + 2e \rightarrow He^* + e$	2.97	1.28	3	12
15	$He_2^+ + e \rightarrow He^* + He$	2.91	1.15	1	1
16	$Ar^+ + e + Ar \rightarrow Ar^* + Ar$	2.9	1.15	0	1
18	$He^+ + e + He \rightarrow He^* + He$	2.89	1.14	0	0
19	$He^+ + e + Ar \rightarrow He^* + Ar$	2.89	1.14	0	0
22	$He^+ + Ar \rightarrow He + Ar^+$	2.9	1.14	0	0
23	$He^+ + Ar + Ar \rightarrow He + Ar_2^+$	2.95	1.17	2	3
29	$He^+ + He + Ar \rightarrow HeAr^+ + He$	2.93	1.16	1	2
31	$Ar_2^+ + Ar \rightarrow Ar^+ + 2Ar$	2.93	1.16	1	2
32	$He_2^+ + e \rightarrow He^+ + He + e$	2.88	1.14	0	0
33	$He_2^+ + He \rightarrow He^+ + 2He$	2.88	1.14	0	0
37	$Ar^* + Ar^* \rightarrow e + Ar + Ar^+$	2.97	1.18	3	4
38	$Ar^* + Ar^* \rightarrow Ar_2^+ + e$	2.93	1.16	1	2
40	$He^* + He^* \rightarrow He^+ + He + e$	2.9	1.14	0	0
41	$He^* + He^* \rightarrow He_2^+ + e$	2.9	1.15	0	1
42	$He_2^+ + e \rightarrow 2He$	2.91	1.15	1	1
43	$He_2^+ + e + He \rightarrow 3He$	2.95	1.17	2	3
44	$He_2^+ + 2e \rightarrow 2He + e$	2.92	1.16	1	2
45	$HeAr^+ + e \rightarrow Ar + He$	2.93	1.16	1	2
50	$Ar_2^* + Ar_2^* \rightarrow Ar_2^+ + 2Ar + e$	2.95	1.17	2	3
51	$Ar_2^* + e \rightarrow Ar_2^+ + 2e$	2.89	1.14	0	0
52	$Ar_2^* + e \rightarrow Ar + Ar^* + e$	2.95	1.17	2	3
53	$Ar_2^* + Ar^* \rightarrow e + Ar + Ar_2^+$	2.89	1.14	0	0
56	$He_2^* + He_2^* \rightarrow He_2^+ + 2He + e$	2.92	1.16	1	2
58	$He_2^* + e \rightarrow He_2^+ + 2e$	2.95	1.17	2	3
59	$He_2^* + e \rightarrow 2He + e$	2.9	1.15	0	1
61	$Ar^* + Ar \rightarrow Ar + Ar$	2.93	1.16	1	2
64	$Ar^* + Ar + Ar \rightarrow 3Ar$	2.94	1.16	1	2

Данные реакции оказывают незначительное влияние на расчетные значения параметров аргоно-гелиевой плазмы и могут быть удалены из кинетической модели без потери точности

вычисления. В модели были оставлены реакции рекомбинации ионов гелия (реакция № 14) и ионизации Пеннинга с возбужденными атомами аргона (реакция № 37), поскольку их исключение привело к значительному расхождению результатов расчета.

На рис. 18 представлены значения концентрации возбужденных атомов, рассчитанные при использовании полной модели и модели с исключенными реакциями, представленными в таблице 9.

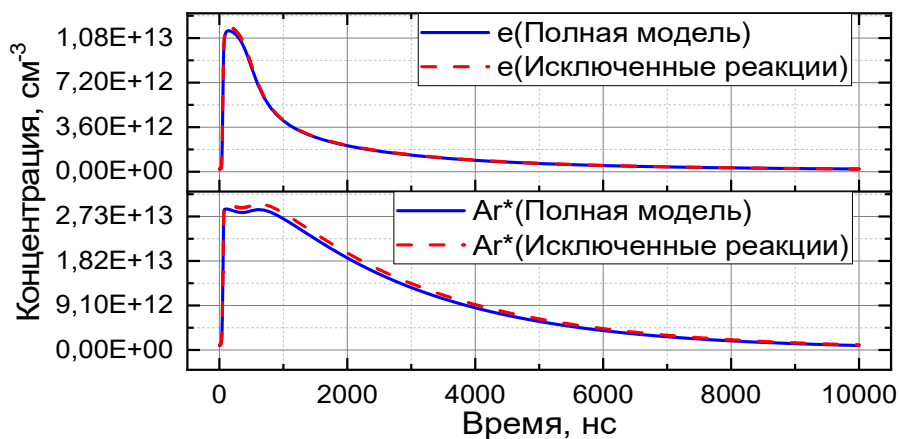


Рис. 18. Результаты расчета концентрации возбужденных атомов аргона для полной модели и модели с исключенными реакциями

Значения концентрации электронов и возбужденных атомов аргона при исключении реакций, приведенных в таблице 9, отличаются не более чем на 3 %. Все реакции из таблицы 9, за исключением (реакция № 14) и (реакция № 37) могут быть исключены из модели без потери точности расчета.

### 3.2. Влияние эксимерных молекул гелия $\text{He}_2^*$

Исследование, проведенное в разделе 2 настоящей работы, позволяет сделать вывод о том, что эксимерные молекулы гелия  $\text{He}_2^*$  не принимают участие ни в одной реакции, определяющей поведение плазмы. Для определения возможности исключения молекул  $\text{He}_2^*$  из модели был проведен расчет концентрации возбужденных атомов аргона и электронов с помощью полной кинетической модели и с помощью модели, из которой были исключены эксимерные молекулы  $\text{He}_2^*$ . Результаты расчета представлены на рис. 19.

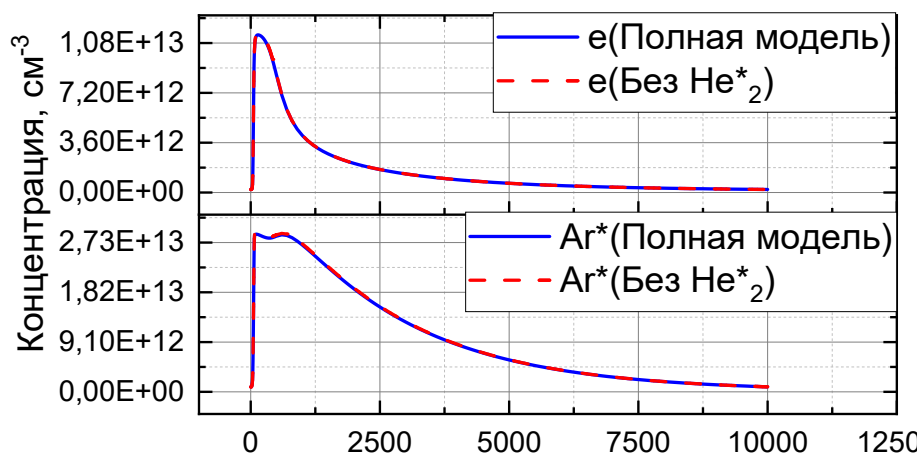


Рис. 19. Результаты расчета концентрации возбужденных атомов аргона для полной модели и модели с исключенными эксимерными молекулами гелия

Значения концентрации электронов и возбужденных атомов аргона при исключении из модели эксимерных молекул гелия отличаются не более чем на 1 %. Эксимерные молекулы влияют на концентрацию частиц плазмы незначительно и могут быть исключены из кинетики модели без потери точности расчета.

### 3.3. Влияние гетероядерных ионов $\text{HeAr}^+$

Результаты расчета, представленные на рис. 3 продемонстрировали, что после прохождения разряда скорости передачи положительного заряда  $\text{Ar}^+ \rightarrow \text{HeAr}^+$  и  $\text{HeAr}^+ \rightarrow \text{Ar}^+$  одинаковы, что позволяет сделать предположение о возможности исключения ионов  $\text{HeAr}^+$  из кинетической модели. Для этого был проведен расчет концентрации возбужденных атомов аргона и электронов с помощью полной кинетической модели и с помощью модели, из которой были исключены ионы  $\text{HeAr}^+$ .

На рис. 20 представлены результаты расчета концентрации возбужденных атомов аргона для полной модели и модели без гетероядерных ионов  $\text{HeAr}^+$ .

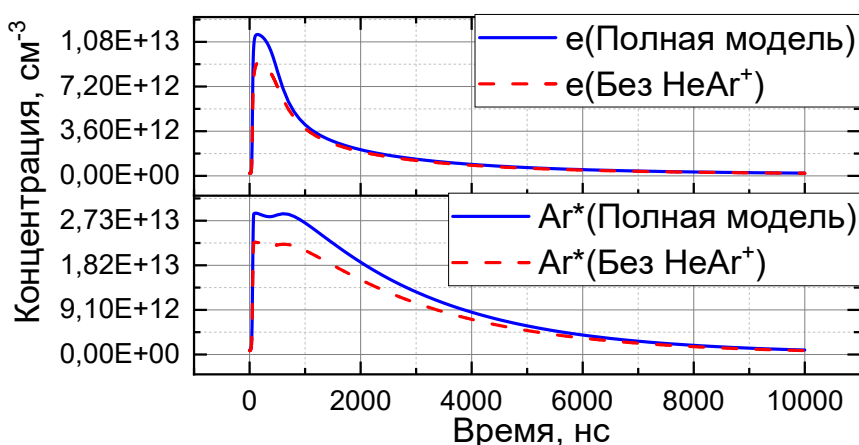


Рис. 20. Результаты расчета концентрации возбужденных атомов аргона для полной модели и модели с исключенными гетероядерными ионами

При исключении гетероядерных ионов  $\text{HeAr}^+$  из кинетической модели расчетные значения концентрации возбужденных атомов аргона и электронов уменьшаются на  $\sim 20\%$ . Учет ионов  $\text{HeAr}^+$  в модели необходим при проведении точных расчетов, но не является необходимым при расчетной оценке параметров плазмы.

Остальные частицы аргоно-гелиевой плазмы принимают участие в реакциях, определяющих поведение плазмы, и не могут быть исключены из кинетической модели.

## 4. Ключевые реакции аргоно-гелиевой плазмы

Проведенные в предыдущих пунктах исследования позволяют составить схему ключевых реакций, являющихся основой кинетики аргоно-гелиевой плазмы импульсного разряда. Схема представлена на рис. 21.

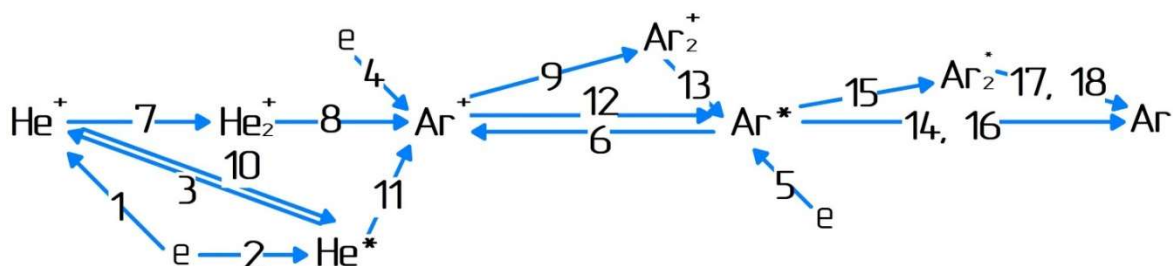


Рис. 21. Схема ключевых реакций аргоно-гелиевой плазмы

Во время прохождения разряда происходит возбуждение и ионизация атомов аргона и гелия при соударении с электронами:

1.  $e + He \rightarrow 2e + He^+$  – ионизация гелия;
2.  $e + He \rightarrow 2e + He^*$  – возбуждение гелия;
3.  $e + He^* \rightarrow 2e + He^+$  – ступенчатая ионизация гелия;
4.  $e + Ar \rightarrow 2e + Ar^+$  – ионизация аргона;
5.  $e + Ar \rightarrow 2e + Ar^*$  – возбуждение аргона;
6.  $e + Ar^* \rightarrow 2e + Ar^+$  – ступенчатая ионизация аргона.

После прохождения разряда ионы участвуют в передаче положительного заряда по цепочке от иона гелия  $He^+$  с наибольшей энергией к гомоядерному иону аргона  $Ar_2^+$  с наименьшей энергией.

7. 
$$\begin{cases} He^+ + He + He \rightarrow He_2^+ + He \\ He^+ + He + Ar \rightarrow He_2^+ + He \end{cases}$$
 – передача положительного заряда от иона  $He^+$  иону  $He_2^+$ ;

8.  $He_2^+ + Ar \rightarrow Ar^+ + 2He$  – передача положительного заряда от иона  $He_2^+$  иону  $Ar^+$ ;

9. 
$$\begin{cases} Ar^+ + Ar + He \rightarrow Ar_2^+ + He \\ Ar^+ + Ar + Ar \rightarrow Ar_2^+ + He \end{cases}$$
 – передача положительного заряда от иона  $Ar^+$  иону  $Ar_2^+$ ;

Атомарный ион гелия  $He^+$  увеличивает концентрацию возбужденных атомов гелия  $He^*$  при рекомбинации.

10.  $He^+ + 2e \rightarrow He^* + e$ ;

Возбужденные атомы гелия  $He^*$  стремительно тушатся посредством ионизации Пеннинга и увеличивают тем самым концентрацию ионов аргона  $Ar^+$ .

11.  $He^* + Ar \rightarrow Ar^+ + He + e$ ;

Ионы  $Ar^+$  и  $Ar_2^+$  увеличивают концентрацию возбужденных атомов аргона  $Ar^*$  при рекомбинации.

12.  $Ar^+ + 2e \rightarrow Ar^* + e$  – рекомбинация ионов  $Ar^+$ ;

13.  $Ar_2^+ + e \rightarrow Ar^* + Ar$  – рекомбинация ионов  $Ar_2^+$ ;

Концентрация возбужденных атомов аргона  $Ar^*$  уменьшается при столкновительном тушении, при образовании эксимерных молекул  $Ar_2^*$  и в излучательных процессах.

14. 
$$\begin{cases} Ar^* + He \rightarrow Ar + He \\ Ar^* + M \rightarrow Ar + M \end{cases}$$
 – столкновительное тушение при столкновении с атомом гелия или с молекулами примесных газов;

15. 
$$\begin{cases} Ar^* + Ar + He \rightarrow Ar_2^* + He \\ Ar^* + Ar + Ar \rightarrow Ar_2^* + He \end{cases}$$
 – образование эксимерных молекул;

16.  $Ar^* \rightarrow Ar + h\nu$  – тушение с испусканием фотона;

Эксимерные молекулы  $Ar_2^*$  аргона тушатся при столкновении с атомами гелия и распаде с испусканием фотона.

17.  $Ar_2^* + He \rightarrow 2Ar + He$  – тушение при столкновении с атомом гелия;

18.  $Ar_2^* \rightarrow 2Ar + h\nu$  – тушение при распаде с испусканием фотона.

## 5. Заключение

В ходе данной работы было проведено теоретическое исследование кинетических процессов, протекающих в аргоно-гелиевой плазме импульсного разряда. Создана кинетическая модель аргоно-гелиевой плазмы, учитывающая взаимодействие 11 энергетических состояний аргона и гелия, участвующих в 64 реакциях. С помощью модели определены ключевые процессы, определяющие поведение плазмы инертных газов в высокочастотном импульсно-

периодическом разряде, и составлена система основных реакций. Определение ключевых процессов позволило снизить количество включенных в модель реакций с 64 до 24, что приводит к упрощению кинетической модели и уменьшению времени проводимых расчетов без потери точности расчетных данных.

Данная система в дальнейшем будет применена для создания кинетических моделей плазм других инертных газов импульсного разряда с аналогичной кинетикой – Kr-He, Ar-Ne, Ne-He и других.

## Литература

1. Адаменков А.А., Адаменков Ю.А., Волков М.А., Выскубенко Б.А., Гаранин С.Г., Горбунов М.А., Домажиров А.П., Егорушин М.В., Калачева А.А., Колобянин Ю.В., Конкина Н.А., Стариков Ф.А., Хлебников А.А., Шайдулина В.А. Лазер на метастабильных атомах Ar\* с поперечной оптической накачкой мощностью 1 Вт // «Квантовая электроника». 2022. Т. 52. № 8. С. 695–697.
2. Адаменков Ю.А., Шайдулина В.А., Юрьев А.В. и др. Генерация на метастабильных атомах криптона на длине волны 893 нм с оптической накачкой. XXX Международная конференция по передовым лазерным технологиям ALT-23, 2023. Сборник тезисов. с. 178.  
[https://altconference.org/documents/alt23/Book%20of%20Abstracts%20ALT\\_2023\\_.pdf](https://altconference.org/documents/alt23/Book%20of%20Abstracts%20ALT_2023_.pdf)
3. Адаменков Ю.А., Шайдулина В.А., Юрьев А.В. и др. Определение концентрации метастабильных атомов аргона в активной среде лазера с оптической накачкой на инертных газах с помощью одномерной модели. XXX Международная конференция по передовым лазерным технологиям ALT-23, 2023. Сборник тезисов. с. 209.  
[https://altconference.org/documents/alt23/Book%20of%20Abstracts%20ALT\\_2023\\_.pdf](https://altconference.org/documents/alt23/Book%20of%20Abstracts%20ALT_2023_.pdf)
4. Адаменков Ю.А., Шайдулина В.А., Юрьев А.В. и др. Исследование влияния кислорода на активную среду лазера с оптической накачкой на инертных газах с помощью кинетической 0-D(t) модели. 20 Международный симпозиум по молекулярной спектроскопии высокого разрешения 2023 (HighRUs-2023), Иркутск 03-07 июля 2023 года. Сборник тезисов.  
[https://symp.iao.ru/files/symp/hrms/20/ru/abstr\\_15537.pdf](https://symp.iao.ru/files/symp/hrms/20/ru/abstr_15537.pdf)
5. Адаменков Ю.А., Шайдулина В.А., Юрьев А.В. и др. Определение оптимальной концентрации инертных газов в активной среде лазера с оптической накачкой с помощью одномерной модели плазмы импульсного разряда. Международная конференция 25 Харитоновские тематические научные чтения «Современные лазерные технологии» 25-29 марта 2024. Сборник тезисов.
6. База данных сечений реакций взаимодействия с электронами [Электронный ресурс]. Режим доступа [https://nl.lxat.net/data/set\\_specA.php](https://nl.lxat.net/data/set_specA.php) (дата обращения 01.03.2024)
7. Zhu X. and Pu Y., A simple collisional–radiative model for low-temperature argon discharges with pressure ranging from 1Pa to atmospheric pressure: kinetics of Paschen 1s and 2p levels, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2010, vol. 43, no. 1. DOI: 10.1088/0022-3727/43/1/015204
8. Dytko N.A., Ionikh Y.Z., Kochetov I.V., Experimental and theoretical study of the transition between diffuse and contracted forms of the glow discharge in argon, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, vol. 41, no. 5. DOI: 10.1088/0022-3727/41/5/055204
9. Emmons D. J. and Weeks D. E., Kinetics of high-pressure argon-helium pulsed gas discharge, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, vol. 121, no. 20. DOI: 10.1063/1.4983678
10. Stankov M., Becker M.M., Hoder T. and Lohagen D. Extended reaction kinetics model for non-thermal argon plasmas and its test against experimental data, *Plasma Sources Science and Technology*, 2022, vol. 31, no. 12. 10.1088/1361-6595/ac9332
11. Shiu S., Biondi M., Dissociative recombination in argon: Dependence of the total rate coefficient and excited-state production on electron temperature, *Physical review A*, 1977, vol. 17, no. 3, pp. 868-872.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.17.868>

12. Zagidullin M.V., Mikheyev P.A., Numerical study of a nanosecond repetitively pulsed discharge in an Ar-He mixture at near atmospheric pressure, *Physics of Plasmas*, 2023, vol. 30, no. 12. <https://doi.org/10.1063/5.0170170>
13. Shon J.W., Kushner M.J., Excitation mechanisms and gain modeling of the high-pressure atomic Ar laser in He/Ar mixtures, *Journal of Applied Physics*, 1994, vol. 75, pp. 1883–1890.
14. Jones J.D., Listert D.G., Wareing D.P., The temperature dependence of the three-body reaction rate coefficient for some rare-gas atomic ion-atom reaction rate coefficient for some atomic ion-atom reactions in the range 100–300 K, *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics*, 1980, vol. 13, no. 16. DOI: 10.1088/0022-3700/13/16/021
15. Kuntner N., Modeling and Simulation of Electronic Excitation in Oxygen-Helium Discharges and Plasma-assisted Combustion, Thesis, 2018. [https://elib.dlr.de/123686/1/Dissertation\\_Nikolaj\\_Kuntner\\_2018.pdf](https://elib.dlr.de/123686/1/Dissertation_Nikolaj_Kuntner_2018.pdf)
16. Karelin A.V., Simakova O.V., Kinetics of the active medium of a multiwave IR xenon laser in hard-ioniser-pumped mixtures with He and Ar, *Quantum Electronics*, 1999, vol. 29, no. 8. DOI 10.1070/QE1999v029n08ABEH001552
17. Rolin M.N., Shabunya S.I., Rostaing J.C., Perrin J.M., Self-consistent modelling of a microwave discharge in neon and argon at atmospheric pressure, *Plasma Sources Science and Technology*, 2007, vol. 16, no. 3. DOI 10.1088/0963-0252/16/3/007
18. Hoskinson A.R., Gregorio J., Hopwood J., Argon metastable production in argon-helium microplasmas, *Journal of Applied Physics*, 2016, vol. 119, no. 23. <https://doi.org/10.1063/1.4954077>
19. Comsol: Plasma Module User's Guide// [Электронный ресурс]. Режим доступа [www.comsol.com](http://www.comsol.com) (дата обращения 01.03.2024)
20. Park G, Lee H, Kim G., Global model of He/O<sub>2</sub> and Ar/O<sub>2</sub> atmospheric pressure glow discharges, *Plasma Processes and Polymers*, 2008, vol. 5, pp. 569–576. <https://doi.org/10.1002/ppap.200800019>
21. Han J., Heaven M., Kinetics of optically pumped Ar metastables, *Optics Letters*, 2014, vol. 39, no. 22, pp. 6541–6544. <https://doi.org/10.1364/OL.39.006541>
22. Novicki S., Krenos J., Absolute quenching cross section for collisions between Ar (3P<sub>0</sub>, 2) and H<sub>2</sub>O, *The Journal of Chemical Physics*, 1988, vol. 89, pp. 7031–7033. <https://doi.org/10.1063/1.455330>
23. Sadeghi N., Setser D.W., Francis A., Czarnetzki U., and Döbel H.F., Quenching rate constants for reactions of Ar(4p'[1/2], 4p[1/2], 4p[3/2], and 4p[5/2]) atoms with 22 reagent gases, *The Journal of Chemical Physics*, 2001, vol. 115, pp. 3144 – 3154. <https://doi.org/10.1063/1.1388037>

## References

1. Adamenkov A. A., Adamenkov Yu. A., Volkov M. A., Vyskubenko B. A., Garanin S. G., Gorbunov M. A., Domazhirov A. P., Egorushin M. V., Kalacheva A. A., Kolobyanin Yu. V., Konkina N. A., Starikov F. A., Khlebnikov A. A., Shaidulina V. A., Laser on metastable Ar\* atoms with transverse optical pumping with a power of 1 W, *Quantum Electronics*, 2022, vol. 52, no. 8, pp. 695–697.
2. Adamenkov Yu. A., Shaidulina V. A., Yuryev A. V., et al., Lasing on optically pumped metastable krypton atoms at 893nm, XXX International Conference on Advanced Laser Technologies ALT-23, 2023, Book of abstracts, pp. 178. [https://altconference.org/documents/alt23/Book%20of%20Abstracts%20ALT\\_2023\\_.pdf](https://altconference.org/documents/alt23/Book%20of%20Abstracts%20ALT_2023_.pdf)
3. Adamenkov Yu. A., Shaidulina V. A., Yuryev A. V., et al., Determination of the concentration of metastable argon atoms in the active medium of an optically pumped rare gas laser using a one-dimensional model. XXX International Conference on Advanced Laser Technologies ALT-23, 2023, Book of abstracts, pp. 209. [https://altconference.org/documents/alt23/Book%20of%20Abstracts%20ALT\\_2023\\_.pdf](https://altconference.org/documents/alt23/Book%20of%20Abstracts%20ALT_2023_.pdf)

4. Adamenkov Yu. A., Shaidulina V. A., Yuriev A. V., et al., Study of the effect of oxygen on the active medium of an optically pumped rare gas laser using the kinetic 0-D(t) model, 20 International Symposium on High Resolution Molecular Spectroscopy 2023 (HighRUs-2023), Irkutsk July 03-07, 2023, Book of abstracts. [https://symp.iao.ru/files/symp/hrms/20/ru/abstr\\_15537.pdf](https://symp.iao.ru/files/symp/hrms/20/ru/abstr_15537.pdf)
5. Adamenkov Yu.A., Shaidulina V.A., Yuryev A.V., et al., Determination of the optimal concentration of inert gases in the active medium of an optically pumped laser using a one-dimensional model of a pulsed discharge plasma. International conference 25 Kharitonov thematic scientific readings “Modern laser technologies” March 25-29, 2024. Book of abstracts. [in Russian]
6. Database of cross sections of reactions of interaction with electrons. [https://nl.lxat.net/data/set\\_specA.php](https://nl.lxat.net/data/set_specA.php), date of access 01.03.2024
7. Zhu X. and Pu Y., A simple collisional–radiative model for low-temperature argon discharges with pressure ranging from 1Pa to atmospheric pressure: kinetics of Paschen 1s and 2p levels, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2010, vol. 43, no. 1. DOI: 10.1088/0022-3727/43/1/015204
8. Dytko N.A., Ionikh Y.Z., Kochetov I.V., Experimental and theoretical study of the transition between diffuse and contracted forms of the glow discharge in argon, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, vol. 41, no. 5. DOI: 10.1088/0022-3727/41/5/055204
9. Emmons D. J. and Weeks D. E., Kinetics of high-pressure argon-helium pulsed gas discharge, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, vol. 121, no. 20. DOI: 10.1063/1.4983678
10. Stankov M., Becker M.M., Hoder T. and Lohagen D., Extended reaction kinetics model for non-thermal argon plasmas and its test against experimental data, *Plasma Sources Science and Technology*, 2022, vol. 31, no. 12. DOI: 10.1088/1361-6595/ac9332
11. Shiu S., Biondi M., Dissociative recombination in argon: Dependence of the total rate coefficient and excited-state production on electron temperature, *Physical review A*, 1977, vol. 17, no. 3, pp. 868–872. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.17.868>
12. Zagidullin M.V., Mikheyev P.A., Numerical study of a nanosecond repetitively pulsed discharge in an Ar-He mixture at near atmospheric pressure, *Physics of Plasmas*, 2023, vol. 30, no. 12. <https://doi.org/10.1063/5.0170170>
13. Shon J.W., Kushner M.J., Excitation mechanisms and gain modeling of the high-pressure atomic Ar laser in He/Ar mixtures, *Journal of Applied Physics*, 1994, vol. 75, pp. 1883–1890.
14. Jones J.D., Listert D. G., Wareing D. P., The temperature dependence of the three-body reaction rate coefficient for some rare-gas atomic ion-atom reaction rate coefficient for some atomic ion-atom reactions in the range 100–300 K, *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics*, 1980, vol. 13, no. 16. DOI: 10.1088/0022-3700/13/16/021
15. Kuntner N., Modeling and Simulation of Electronic Excitation in Oxygen-Helium Discharges and Plasma-assisted Combustion, Thesis, 2018. [https://elib.dlr.de/123686/1/Dissertation\\_Nikolaj\\_Kuntner\\_2018.pdf](https://elib.dlr.de/123686/1/Dissertation_Nikolaj_Kuntner_2018.pdf)
16. Karelin A. V., Simakova O. V., Kinetics of the active medium of a multiwave IR xenon laser in hard-ioniser-pumped mixtures with He and Ar, *Quantum Electronics*, 1999, vol. 29, no. 8. DOI 10.1070/QE1999v029n08ABEH001552
17. Rolin M. N., Shabunya S. I., Rostaing J. C., Perrin J. M., Self-consistent modelling of a microwave discharge in neon and argon at atmospheric pressure, *Plasma Sources Science and Technology*, 2007, vol. 16, no. 3. DOI 10.1088/0963-0252/16/3/007
18. Hoskinson A.R., Gregorio J., Hopwood J., Argon metastable production in argon-helium microplasmas, *Journal of Applied Physics*, 2016, vol. 119, no. 23. <https://doi.org/10.1063/1.4954077>
19. Comsol: Plasma Module User’s Guide// [Электронный ресурс]. Режим доступа [www.comsol.com](http://www.comsol.com) (дата обращения 01.03.2024)
20. Park G, Lee H, Kim G., Global model of He/O<sub>2</sub> and Ar/O<sub>2</sub> atmospheric pressure glow discharges, *Plasma Processes and Polymers*, 2008, vol. 5, pp. 569–576. <https://doi.org/10.1002/ppap.200800019>

21. Han J., Heaven M., Kinetics of optically pumped Ar metastables, *Optics Letters*, 2014, vol. 39, no. 22, pp. 6541–6544. <https://doi.org/10.1364/OL.39.006541>
22. Novicki S., Krenos J., Absolute quenching cross section for collisions between Ar (3P<sub>0</sub>, 2) and H<sub>2</sub>O, *The Journal of Chemical Physics*, 1988, vol. 89, pp. 7031–7033. <https://doi.org/10.1063/1.455330>
23. Sadeghi N., Setser D.W., Francis A., Czarnetzki U., and Döbel H.F., Quenching rate constants for reactions of Ar(4p'[1/2], 4p[1/2], 4p[3/2], and 4p[5/2]) atoms with 22 reagent gases, *The Journal of Chemical Physics*, 2001, vol. 115, pp. 3144–3154. <https://doi.org/10.1063/1.1388037>

Статья поступила в редакцию 29 июля 2024 г.