

## ТЕСТИРОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КИНЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ГАЗОВОЙ ГЕЛИЙ-АЗОТ-ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ

А.П. Будник, Е.Э. Кузнецова

ГНЦ РФ Физико-энергетический институт, им А.И. Лейпунского,  
г. Обнинск, 249033 Калужская область, пл. Бондаренко, 1

### Аннотация

Настоящая работа посвящена исследованию кинетики He-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> плазмы, используемой в качестве лазерно-активной среды. С помощью разработанной многокомпонентной кинетической модели He-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> ядерно-возбуждаемой плазмы в настоящей работе был проведен вычислительный эксперимент по сравнению результатов математического моделирования с экспериментальными данными. Тестируемая модель He-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> газовой смеси включает около 300 физико-химических процессов и 72 компоненты плазмы. Для сравнения с экспериментальными данными была использована пространственно-однородная и изотропная модель, в которой не учитывались гидродинамические процессы переноса, а рассматривалось только перераспределение частиц и энергии между ними в результате плазмохимических процессов.

### TESTING OF THE MATHEMATICAL MODEL OF KINETIC PROCESSES OF HELIUM-NITROGEN-HYDROGEN GAS PLASMA

The work observed of the research of kinetic of He-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> plasma, which use as laser-active medium. By means of the developed multi-component kinetic model of nuclear-excited plasma in the present work computing experiment for the compare of results of mathematical simulation with experimental data was made. The testing model of He-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> gas mixture includes about 300 physical-chemical processes and 72 components of plasma. For the compare with experimental data it was used spatial-homogeneous and isotropic model in which hydrodynamic processes of carry were not taken into account and redistribution of particles and energy between them as result plasma-chemical reactions was considered only.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время исследованы и успешно используются десятки лазерно-активных газовых сред при различных типах накачки. Однако наиболее эффективными на сегодняшний день являются лазеры, работающие в желто-красном и инфракрасном диапазонах спектра. Тем не менее, с исследовательской точки зрения, интересны так же те газовые смеси, с помощью которых можно получить излучение в синезеленой и ближней ультрафиолетовой областях спектра. Одной из таких сред является He-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> газовая смесь.

Задача о построении схемы кинетических процессов движущейся газовой плазмы является весьма сложной, требующей постоянного совершенствования модели из-за динамично развивающихся знаний о плазмохимических процессах. Так, например, для первых теоретических оценок эффективности He-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> газовой смеси считалось достаточным около десятка реакций [1]. В процессе эволюции знаний о плазмохимии этой сложной среды модель, состоящая более чем из ста кинетических процессов, уже кажется недостаточной [2]. В условиях появления больших вычислительных мощностей задача о создании сложной двумерной пространственно-неоднородной модели кажется весьма перспективной. Такая модель позволит моделировать сложные пространственно-неоднородные эффекты в движущейся газовой плазме [3].

Создание пространственно-неоднородной модели естественным образом распадается на несколько этапов:

1. Разработка модели кинетических процессов, учитывающей плазмохимию среды как при традиционных методах накачки (возбуждение пучком элек-

тронов, газовым разрядом и т.д.), так и при ядерной накачке.

2. Исследование кинетики среды с помощью разработанной модели.

3. Сравнение результатов математического моделирования характеристик лазерно-активной среды с признанными и хорошо известными в этой области экспериментальными и теоретическими работами.

4. Проведение серии экспериментов по математическому моделированию коэффициентов усиления, КПД, порога генерации лазерно-активной среды в широком диапазоне давлений, энерговыкладов и составов газовой смеси с учетом характеристик лазерной установки, для того чтобы определить оптимальные условия работы такого лазера.

5. Создание двумерной пространственно-неоднородной модели движущейся газовой плазмы.

Настоящая работа в основном посвящена третьему этапу. Особенности кинетической модели неоднократно обсуждались, см. например, [4].

## 2. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ КИНЕТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ HE-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> АКТИВНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СРЕДЫ

В настоящей работе представлена доработанная и расширенная модель кинетических процессов He-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> активной среды ЛЯН, в которой рассматривается 75 компонент и учитывается около 300 плазмохимических реакций. Большинство из них было включено в рассмотрение впервые (рис.1). На рис. 1 представлены основные компоненты, рассматриваемые в среде, а также указаны основные каналы перекачки энергии.

Основными реакциями, используемыми при оценке эффективности такой среды, считались двух- и трех-



веденным параметрам в настоящей работе была оценена максимальная удельная мощность энерговклада в активную среду. Так как при прохождении электронного пучка сквозь достаточно плотную активную среду мощность энерговклада существенно падает, в настоящей работе были рассчитаны коэффициенты усиления слабого сигнала согласно данным работы [5] для среднего по объему значения мощности энерговклада ( $P_{beam} = P_{beam}^{max}/2$ ), а также значения  $\alpha$  [см<sup>-1</sup>] для сечения вынужденного излучения, согласно работе [1].

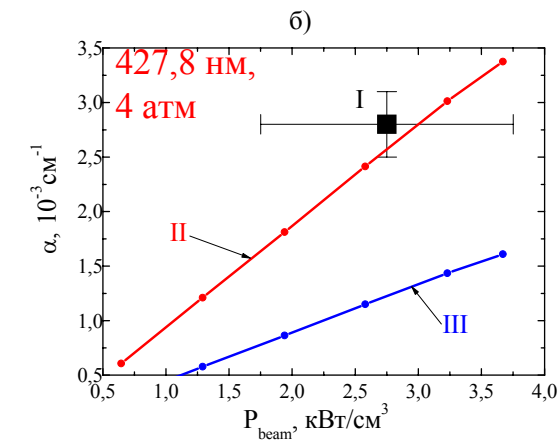
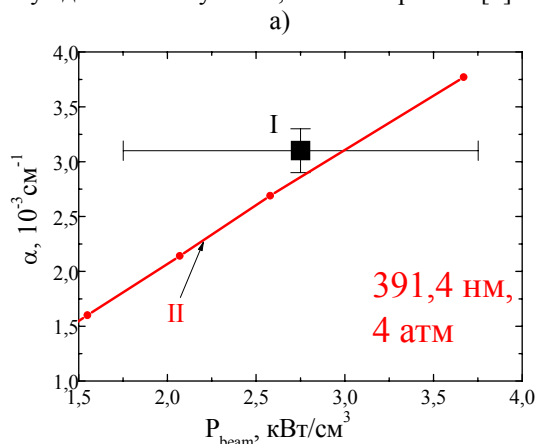


Рис.3. Зависимость коэффициента усиления слабого сигнала от максимальной удельной мощности энерговклада для давления смеси 4 атм для оптимального состава газовой смеси [5]. На рисунке: I - экспериментальные значения работы [5]; II - результат математического моделирования с сечением работы [5]; III - результат математического моделирования с сечением работы [1]

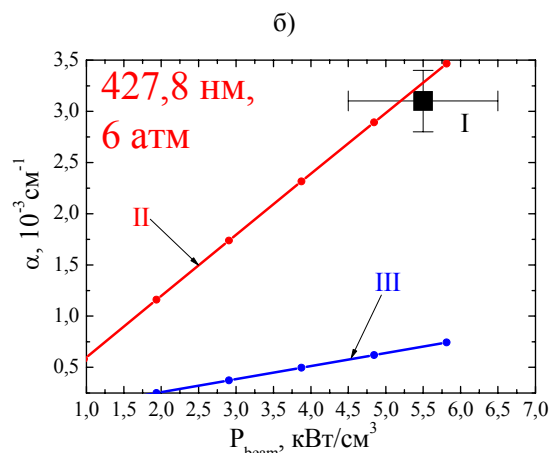
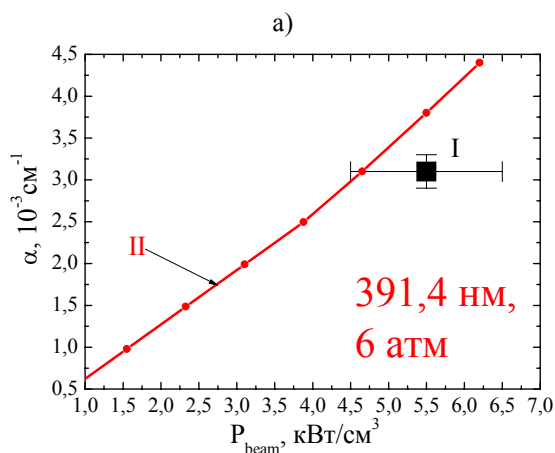


Рис.4. Зависимость коэффициента усиления слабого сигнала от максимальной удельной мощности энерговклада для давления смеси 6 атм для оптимального состава газовой смеси [5]. На рисунке: I - экспериментальные значения работы [5]; II - результат математического моделирования с сечением работы [5]; III - результат математического моделирования с сечением работы [1]

Таблица 1. Сравнение значений коэффициентов усиления слабого сигнала с экспериментальными данными работы [5]

P, атм	λ и состав He/N <sub>2</sub> /H <sub>2</sub>	α × 10 <sup>-3</sup> , см <sup>-1</sup>	
		Работа [5]	Настоящая работа
4	391.4 нм 4атм/8торр/10торр	3.1±0.2	2.8 [5]
	427.8 нм 4атм/4торр/3торр	2.8±0.3	2.5 [5] 1.3 [1]
6	391.4 нм 6атм/8торр/10торр	3.2±0.2	3.8 [5]
	427.8 нм 6атм/4торр/3торр	3.1±0.3	3.3 [5] 0.7 [1]

### 3.2. Экспериментальные исследования ядерно-возбуждаемой He-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> смеси

Настоящая модель кинетических процессов разрабатывалась, в основном, для ядерно-возбуждаемой плазмы. На сегодняшний день в нашей стране созданием лазеров с ядерной накачкой на гелий-азот-водородной активной среде занимаются два научно-исследовательских института: ВНИИТФ (г. Снежинск) и ГНЦ РФ ФЭИ (г. Обнинск). Для тестирования разработанной модели He-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> плазмы были использованы данные работ [6–9]

В работе [6] впервые сообщается о получении генерации в He-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> активной среде с помощью ядер-

ной накачки. Генерация была получена для двух длин волн  $\lambda = 391.4$  нм и  $\lambda = 427.8$  нм. В работе [6] также представлены результаты оптимизации активной смеси по составу.

С помощью разработанной модели кинетических процессов для параметров реактора ЭБР-Л были определены коэффициенты усиления слабого сигнала, а также получены оптимизационные кривые для определения рабочего состава газовой смеси.

Параметры реактора ЭБР-Л, которые использовались при тестировании разработанной кинетической модели:

Кювета с внутренним диаметром активного слоя 11 мм. Эффективная длина слоя 45 см. Длина полуконфокального резонатора 90 см.

Параметры зеркал:  $R = 97.5\%$  для  $\lambda = 391.4$  нм и  $R = 97.4\%$  для  $\lambda = 427.8$  нм. (где  $R$  – коэффициенты отражения зеркал).

Длина импульса  $\tau = 400$  мкс.

В работе четко не указана мощность энерговклада в среду. Указано значение  $700$  Вт/см<sup>3</sup> но не указано при каком давлении. В работе [6] приводятся два давления активной среды 3.5 атм и 5 атм. На рис.5–7 приведены результаты расчетов разработанной кинетической модели для двух вариантов:

I – зависимость коэффициента усиления от общего давления активной среды при постоянной максимальной удельной мощности энерговклада, т.е. при любом давлении  $P_{beam} = 700$  Вт/см<sup>3</sup>;

II – зависимость коэффициента усиления от общего давления активной среды при постоянной плотности потока осколков деления, попадающих в активную среду, т.е. при давлении  $P = 3.5$  атм максимальная удельная мощность энерговклада  $P_{beam} = 700$  Вт/см<sup>3</sup>, (при увеличении давления мощность будет возрастать, а  $j_{beam} = const$ );

III – зависимость коэффициента усиления от общего давления активной среды. Результаты работы [6].

Из-за низкого качества полиграфии трудно было определить наличие экспериментальной точки при 8 атм, поэтому на рисунке она изображена перечеркнутым символом.

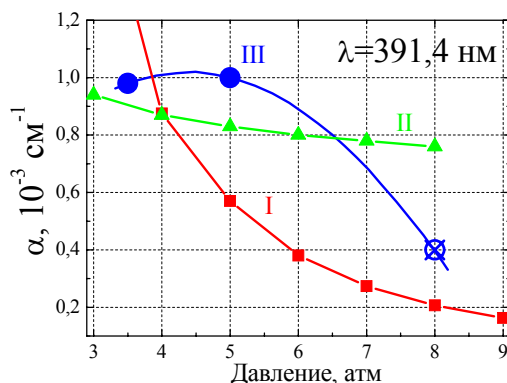


Рис. 5. Зависимость коэффициента усиления от суммарного давления. На рисунке: I – расчет при  $P_{beam} = const$ ; II – расчет при  $j_{beam} = const$ ; III – экспериментальные данные [6]

На рис.6–7 зависимость коэффициента усиления на переходах 391.4 нм и 427.8 нм от концентрации водорода для двух случаев ( $P_{beam} = const$  и  $j_{beam} = const$ ).

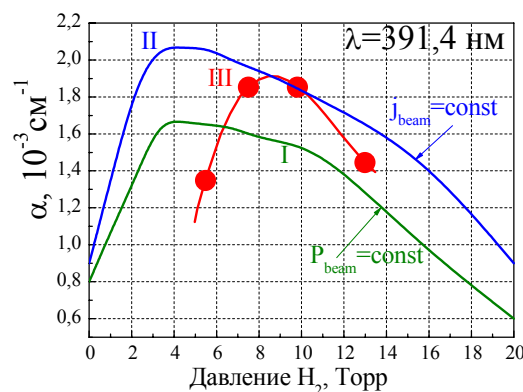


Рис. 6. Зависимость коэффициента усиления на переходе 391.4 нм от концентрации водорода (суммарное давление 5 атм). На рисунке: I – расчет при  $P_{beam} = const$ ; II – расчет при  $j_{beam} = const$ ; III – экспериментальные данные [6]

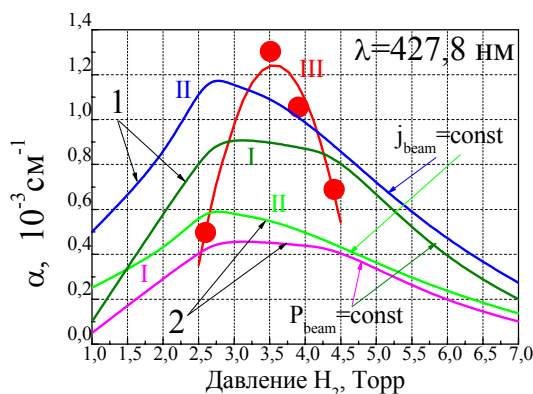


Рис. 7. Аналогично рис. 6 для  $\lambda = 427.8$  нм ( $P_{tot} = 5$  атм). На рисунке: 1 – расчет с сечением работы [5]; 2 – расчет с сечением работы [1]

Тогда полученные результаты удобно привести в таблицах 2–3.

Таблица 2. Сравнение результатов математического моделирования настоящей работы с данными работы [6] для  $\lambda = 391.4$  нм

№	Параметр	Работа [6]	Настоящая работа
1	Оптимальный состав смеси [He] / [N <sub>2</sub> ] / [H <sub>2</sub> ]	5 атм / 3.0 торр / 9.0 Торр	
2	I. Пиковая удельная мощность накачки, Вт/см <sup>3</sup>	700	700
	II. при 3.5 атм $P_{beam} = 700$ Вт/см <sup>3</sup> ; $j_{beam} (3.5 \text{ атм}) = j_{beam} (5 \text{ атм}) = const$	-----	1000
3	Ненасыщенный коэффициент усиления $g_{0(max)}$ , см <sup>-1</sup>	$1.9 \times 10^{-3}$	$1.55 \times 10^{-3}$ (I вар) $1.9 \times 10^{-3}$ (II вар)
4	Максимальная мгновенная эффективность лазера по мощности, %	0.3	0.07 (I вар) 0.1 (II вар)

Таблица 3. Сравнение результатов математического моделирования настоящей работы с данными работы [6] для  $\lambda = 427.8$  нм

№	Параметр	Работа [6]	Настоящая работа
1	Оптимальный состав смеси [He] / [N <sub>2</sub> ] / [H <sub>2</sub> ]	5 атм / 3.0 торр / 3.5 Торр	
2	I. Пиковая удельная мощность накачки. Вт/см <sup>3</sup>	700	700
	II. при 3.5 атм $P_{beam} = 700$ Вт/см <sup>3</sup> ; $j_{beam}(3.5атм) = j_{beam}(5атм) = const$	-----	1000
3	Ненасыщенный коэффициент усиления $g_{0(max)}$ . см <sup>-1</sup>	$1.3 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-3}$ (I вар) $0.9 \times 10^{-3}$ (II вар)
4	Максимальная мгновенная эффективность лазера по мощности, %	0.2	$0.05 \div 0.07$ (I вар) $R = (97.2 \div 97.4)\%*$
			$0.09 \div 0.1$ (II вар) $R = (97.2 \div 97.4)\%*$

Примечание:

\* – R коэффициент отражения зеркал резонатора, согласно [6].

Таким образом, в настоящей работе было проведено сравнение результатов математического моделирования, полученных с помощью разработанной модели кинетических процессов с экспериментальными результатами работы [6]. В целом, результаты удовлетворительно согласуются друг с другом.

В ГНЦ РФ ФЭИ более 10 лет ведутся работы по исследованию генерационных характеристик УФ лазера с ядерной накачкой. За это время был выполнен целый ряд экспериментальных работ, в том числе, и по исследованию спектрально-кинетических характеристик люминесценции в треке одиночного осколка деления [7].

В работе [7] приведены временные распределения люминесценции He-N<sub>2</sub> смесей для полос 1-й отрицательной системы азота при различных полных давлениях для смесей с содержанием азота 0.026%.

На рис. 8–9 представлены экспериментальные результаты, а также результаты моделирования люминесценции с помощью разработанной модели кинетических процессов в относительных единицах.

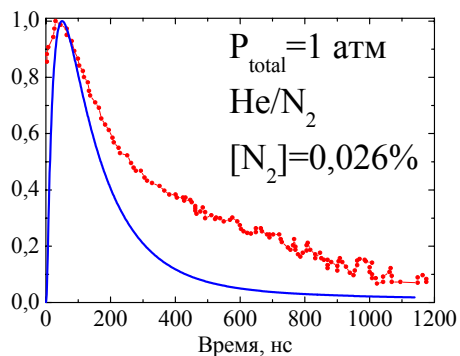


Рис. 8. Временное распределение люминесценции He-N<sub>2</sub> смеси для (0-0) полосы 1-й отрицательной системы азота ( $\lambda = 391.4$  нм) при давлении 1 атм (в относительных единицах)

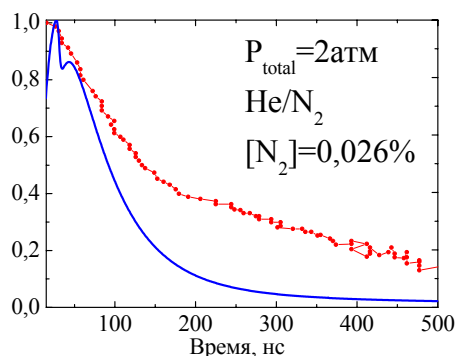


Рис. 9. Временное распределение люминесценции He-N<sub>2</sub> смеси для (0-0) полосы 1-й отрицательной системы азота ( $\lambda = 391.4$  нм) при давлении 2 атм (в относительных единицах)

В целом результаты, полученные с помощью настоящей математической модели, удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

Различие между экспериментальной и теоретически полученной зависимостями объясняется тем, что трек одиночного осколка деления имеет сильно неоднородную структуру, см., например, [8, 9]. Настоящая математическая модель не учитывает трековую структуру плазмы, что может существенно влиять на форму кривой люминесценции.

Наряду с изучением характеристик люминесценции среды в ГНЦ РФ ФЭИ последние несколько лет экспериментально исследуются генерационные характеристики гелий азот-водородной ядерно-возбуждаемой среды [10, 11].

Согласно данным работы [10] за 2007 г. параметры стенда Б ГНЦ РФ ФЭИ:

- параметры ЛАЭЛа: длина = 280 см, диаметр = 4.8 см;
- коэффициент отражения зеркал = 98%;
- длительность импульса 1.2 мс, форма импульса соответствует приведенному в работе [10].

Основные результаты работы приведены в таблицах 4–5 и на рис. 9–10. Для длины волны  $\lambda = 391.4$  нм оптимизация состава не проводилась. Для длины волны  $\lambda = 427.8$  нм было рассмотрено несколько составов активной среды. При математическом моделировании генерационных характеристик среды сечения вынужденного излучения варьировались. Были использованы как нелинейные зависимости согласно данным работ [1, 5], так и стандартная зависимость сечения от давления буферного газа:  $1/P_{[He]}$ .

На рис. 10 представлены зависимости ненасыщенного коэффициента усиления от общего давления смеси (условия накачки см. табл. 5) для длины волны 428 нм для трёх способов задания эффективного сечения вынужденного излучения:

I – ненасыщенный коэффициент усиления при задании стандартной зависимости  $\sigma \sim 1/P$ ;

II – при расчёте ненасыщенного коэффициента усиления были использованы значения эффективного сечения вынужденного излучения работы [5]. Пустые точки изображенные на рисунке это значения коэффициента усиления рассчитанные для экстраполированных значений эффективного сечения вынужденного излучения, т.к. в работе [10] эти значения приводятся с 2 атм;

III – при расчёте ненасыщенного коэффициента усиления были использованы значения эффективного сечения вынужденного излучения работы [1].

На рис.10 указано также значение коэффициента усиления работы [10] (см. табл. 5). В виду того что, зависимости настоящей работы были рассчитаны раньше, чем появилась возможность сравниться с экспериментальными результатами ГНЦ РФ ФЭИ, на указанных рисунках приведены кривые рассчитанные при давлении 1.7 атм, а значения работы [10] даны при давлении 1.5 атм.

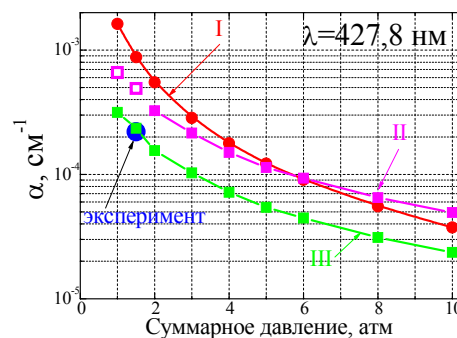


Рис. 10. Зависимость ненасыщенного коэффициента усиления от суммарного давления смеси (условия накачки см. табл.5) для длины волны 428 нм

Таблица 4. Сравнение результатов математического моделирования настоящей работы с данными работы [10] для  $\lambda = 391.4$  нм

№	Параметр	Работа [10]	Настоящая работа
1	Оптимальный состав смеси [He] / [N <sub>2</sub> ] / [H <sub>2</sub> ]	1000 / 1.1 / 2.15	1000 / 1.1 / 2.15 (оптимизация по составу смеси не проводилась)
2	Суммарное давление, атм	1.8	1.8
3	Пиковая удельная мощность накачки, Вт/см <sup>3</sup>	250	250
4	Ненасыщенный коэффициент усиления $g_{0(max)}$ , см <sup>-1</sup>	$3 \times 10^{-4}$	$1.2 \times 10^{-3}$
5	Максимальная мгновенная эффективность лазера по мощности, %	0.26	0.65

Таблица 5. Сравнение результатов математического моделирования настоящей работы с данными работы [10] для  $\lambda = 427.8$  нм

№	Параметр	Работа [10]	Настоящая работа	Составы смеси, рассматриваемые в настоящей работе
1	Оптимальный состав смеси [He] / [N <sub>2</sub> ] / [H <sub>2</sub> ]	1000 / 1.0 / 1.1	1000 / 1.0 / 1.1	1000 / 1.5 ÷ 4.0 / 1.0 ÷ 2.0
2	Суммарное давление, атм	1.5	1.5	1.5
3	Пиковая удельная мощность накачки, Вт/см <sup>3</sup>	230	230	230
4	Ненасыщенный коэффициент усиления $g_{0(max)}$ , см <sup>-1</sup>	$2.2 \times 10^{-4}$	$4.9 \times 10^{-4}$	$(4.8 \div 7.0) \times 10^{-4}$ [5]
5	Максимальная мгновенная эффективность лазера по мощности, %	0.19	0.31	0.30 ÷ 0.43 [5]

До публикации работы [10] для стенда Б ГНЦ РФ ФЭИ для длины волны 427.8 нм рабочим давлением считалось 1.7÷1.8 атм. Так как значения давлений не сильно отличаются, то авторы настоящей работы считают корректным сравнение экспериментально полученных значений с данными настоящей работы.

Одной из последних работ по экспериментальному исследованию ядерно возбуждаемой He-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> плазмы является работа [11]. Для данных этой работы было проведено математическое моделирование генерационных характеристик среды. Параметры установки соответствуют предыдущей работе. Отличие заключается в коэффициенте отражения зеркал:

для  $\lambda = 391.4$  нм  $R_1 = 1.07\%$ ,  $R_2 = 0.06\%$ ;

для  $\lambda = 427.8$  нм  $R_1 = 0.7\%$ ,  $R_2 = 0.7\%$ ;

и в длительности импульса накачки ~10 мс.

Более подробно условия эксперимента представлены в таблице 6. На рисунках 11–13 представлены экспериментальные результаты работы [11], а так же результаты математического моделирования для разных значений сечения вынужденного излучения и коэффициентов нерезонансных потерь.

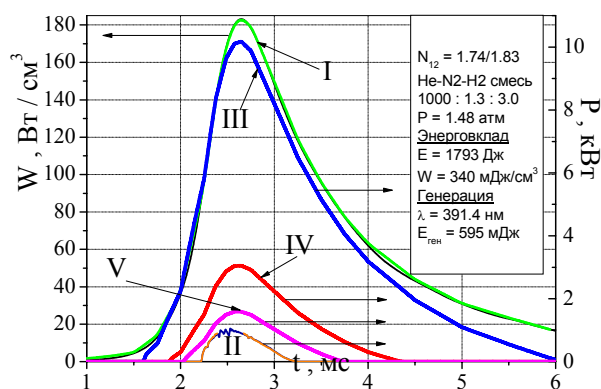


Рис. 11. Зависимость от времени удельной мощности накачки (I) и мощности лазерной генерации для  $\lambda = 391.4$  нм: II – экспериментальные данные; III – без потерь в резонаторе; IV – коэффициент нерезонансных потерь  $5 \times 10^{-5}$  см<sup>-1</sup>; V – коэффициент нерезонансных потерь  $10 \times 10^{-5}$  см<sup>-1</sup>. Сечение соответствует данным работы [5]

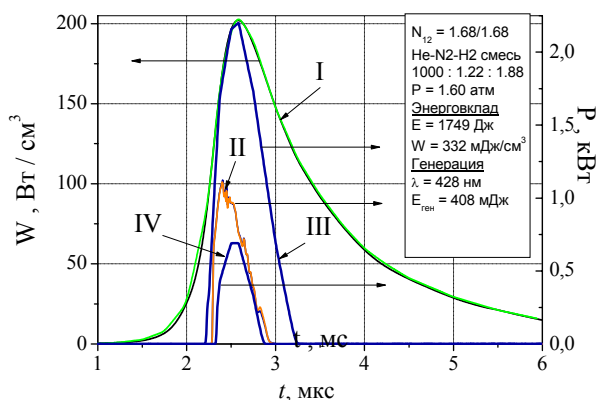


Рис. 12. Зависимость от времени удельной мощности накачки (I) и мощности лазерной генерации для  $\lambda = 427.8$  нм: II – экспериментальные данные; III – коэффициент нерезонансных потерь  $5 \times 10^{-5} \text{ см}^{-1}$ ; IV – коэффициент нерезонансных потерь  $10 \times 10^{-5} \text{ см}^{-1}$ . Сечение соответствует данным работы [1]

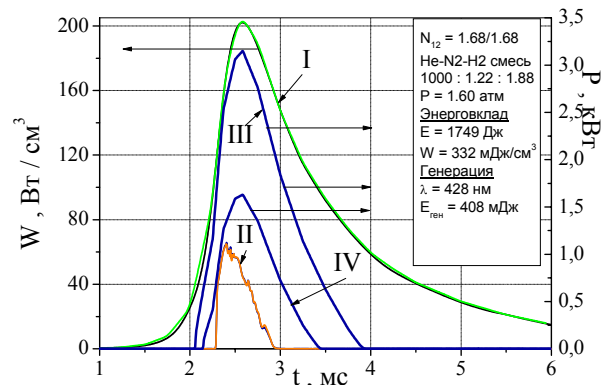


Рис. 13. То же, что и рис.12  
Сечение соответствует данным работы [5]

Таблица 6. Сравнение результатов математического моделирования с экспериментальными данными работы [11]

	Параметры среды	$W$ , мДж/см <sup>3</sup>	$P_{max}$ , Вт/см <sup>3</sup>	$E_{ген}$ , Дж	$t_{ген}$ , мс
<b>переход с длиной волны 391.4 нм</b>					
Эксперимент	$p = 1.48$ атм $p_{N_2} = 1.47$ торр $p_{H_2} = 3.38$ торр	340	183	0.594	1.070
Настоящая работа		314 [5]	183	3.406* 1.402** [5]	2.450* 1.707** [5]
<b>переход с длиной волны 427.8 нм</b>					
Эксперимент	$p = 1.70$ атм $p_{N_2} = 1.11$ торр $p_{H_2} = 1.66$ торр	339	205	266	0.648
Настоящая работа		310 [1]	205	1090* 206** [1]	1.014* 0.546** [1]
		310 [5]		2327* 911** [5]	1.819* 1.269** [5]
Эксперимент	$p = 1.60$ атм $p_{N_2} = 1.48$ торр $p_{H_2} = 2.28$ торр	332	202	408	0.740
Настоящая работа		305 [1]	202	1273* 243** [1]	1.047* 0.562** [1]
		305 [5]		2756* 1097** [5]	1.839* 1.283** [5]

Примечание:

- \* – расчеты проводились с коэффициентом нерезонансных потерь  $5 \times 10^{-5} \text{ см}^{-1}$ ;
- \*\* – расчеты проводились с коэффициентом нерезонансных потерь  $10 \times 10^{-5} \text{ см}^{-1}$

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве основных результатов настоящей работы можно выделить следующее:

1. Выполнено тестирование разработанной модели кинетических процессов He-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> газовой плазмы на 1-ой отрицательной системе азота. Моделирование генерационных характеристик среды проводилось для двух типов возбуждения среды: электронным пучком и осколками деления. Расчеты проводились для значений сечения вынужденного излучения, согласно данным работ [1,5], а также часто используемой зависимости этого сечения от давления как 1/P.

2. В случае возбуждения активной среды пучком электронов наиболее корректное согласие расчетов коэффициента усиления слабого сигнала с экспериментальными значениями получено для сечения вынужденного излучения работы [5].

3. В случае сравнения результатов математического моделирования с экспериментальными данными по временному распределению люминесценции He-N<sub>2</sub> смеси, возбуждаемой осколками деления, также получено удовлетворительное согласие. Различие между экспериментальной и теоретически полученной зависимостями объясняется тем, что трек одиночного осколка деления имеет сильно неоднородную структуру.

4. Проведено математическое моделирование генерационных характеристик He-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> газовой среды, возбуждаемой осколками деления. Для тестирования настоящей модели были выбраны работы [6,10,11]. Модель удовлетворительно описывает результаты эксперимента в пределах ошибок и неопределенностей этих экспериментальных данных.

Исследования проведены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 08-08-00456).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Collins C.B. The Nitrogen Ion Laser Pumped by Charge Transfer // J. Quant. El. 1984. Vol. QE-20. N 1. P. 47-62.
2. Алферов Ю.Б., Будник А.П., Соколов Ю.В. Теоретическое исследование кинетических процессов в активной среде гелий-азотного лазера с ядерной накачкой // Препринт ФЭИ-2670. Обнинск. 1997. 33с.
3. Алексеева И.В., Будник А.П., Сипачев А.В. Математическое моделирование кинетических процессов в неоднородной аргон-ксеноновой газовой плазме оптических квантовых усилителей с прямой накачкой осколками деления // Труды Международной конференции "VIII Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии", 21–24 марта 2006. Саров. С. 362–368.
4. Будник А.П., Кузнецова Е.Э. Модель физико-химической кинетики гелий-азот-водородной ядерно-возбуждаемой плазмы // Труды 2-й Всероссийской школы-семинара "Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем", 1-2 декабря 2008. С. 83–90.
5. Александров А.Ю., Долгих В.А., Керимов О.М., Рудой И.Г., Самарин А.Ю., Сорока А.М. Эффективные столкновительные лазеры в видимой и УФ-областях спектра // Известия АН СССР, Серия физическая, 1989. Т.53. №8. С.1474–1482.
6. Бочков А.В., Магда Э.П., Мироненко В.В., Мурзин В.М., Софиенко Г.С. Исследование лазера на 1-ой отрицательной полосе азота // Труды 3-ей международной конференции «Проблемы лазеров с ядерной накачкой и импульсные реакторы» Снежинск, 2003, С.28–34.
7. Дюжов Ю.А., Полетаев Е.Д. Спектрально-кинетические характеристики люминесценции Ar-N<sub>2</sub> и He-N<sub>2</sub> смесей при возбуждении осколками деления // Препринт ФЭИ-2671, Обнинск, 1997. 18с.
8. Будник А.П., Вакуловский А.С., Добровольская И.В. Влияние трековой структуры плазмы на кинетические процессы в лазерах с накачкой осколками деления // Письма в ЖТФ. 1994. Т.20. Вып. 23. С.67–72.
9. Будник А.П., Добровольская И.В. Исследование влияния параметров среды на трековые эффекты // Препринт № 2498. Обнинск: ФЭИ. 1996. 34с.
10. Полетаев Е.Д., Дюжов Ю.А., Евтодиев Д.В., Кухарчук О.Ф., Смольский В.Н., Суворов А.А., Фокина О.Г. Изучение лазерных характеристик He-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>-среды на переходах 1-й отрицательной системы азота при накачке осколками деления от импульсного реактора БАРС-6 // Труды регионального конкурса научных проектов в области естественных наук, Калуга 2008., Вып. 13, С.104–108.
11. Полетаев Е.Д., Дюжов Ю.А., Кухарчук О.Ф., Смольский В.Н., Суворов А.А., Фокина О.Г. Экспериментальные и теоретические исследования процессов прямого преобразования ядерной энергии в когерентное оптическое излучение видимого диапазона длин волн // Труды регионального конкурса научных проектов в области естественных наук, Калуга 2009., Вып. 14, С.127–138.