

КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГЕЛИЕВОЙ ЯДЕРНО-ВОЗБУЖДАЕМОЙ ПЛАЗМЫ, СОДЕРЖАЩЕЙ НАНОЧАСТИЦЫ

А.П. Будник, В.А. Косарев

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

Аннотация

В докладе представлена кинетическая модель гелиевой газовой плазмы, содержащей наночастицы, создаваемой жестким ионизатором. А также приведены результаты математического моделирования кинетических процессов в такой плазме с учетом влияния нанокластеров. Кинетическая модель включает 21 компоненту плазмы и более 500 плазмохимических процессов.

KINETIC MODEL OF THE HELIUM NUCLEAR INDUCED PLASMA CONTAINING NANOCCLASTERS

In the report the kinetic model of helium gas plasma containing dust-particles, is submitted by a created rigid ionizer. And also results of mathematical modeling of kinetic processes in such plasma nanoclusters are be taken into account. The kinetic model includes to 21 components of plasma and more than 500 plasma-chemical processes.

1. ВВЕДЕНИЕ

Разработка кинетической модели ядерно-возбуждаемой плазмы, содержащей наночастицы, является весьма перспективной в области исследований кинетических процессов в активных газовых средах лазеров с ядерной накачкой по следующим обстоятельствам.

Во-первых, недавно было установлено что, активная среда газовых лазеров с прямым возбуждением осколками деления урана вследствие распыления урансодержащих покрытий естественным образом может в значительных количествах загрязняется нанокластерами, в состав которых входит уран [1–3]. К тому же давно было предложено использовать аэрозольные среды в качестве активной среды лазеров с ядерной накачкой [4–6]. Из-за сложных технических проблем при работе с радиоактивными аэрозолями такой метод ядерно-оптического преобразования энергии практически не изучен. Кроме того, перспективы применения аэрозольных сред в качестве активных сред лазеров с ядерной накачкой существенно ограничены из-за процессов рассеяния и поглощения пылевыми частицами лазерного излучения. Для инфракрасного лазерного излучения, генерируемого активной средой, существенное преимущество можно получить при применении наночастиц, распыленных в активной среде. В этом случае рассеяние лазерного излучения происходит в рэлеевской области. Следовательно, при таких размерах пылевых частиц значительно уменьшается ослабление инфракрасного лазерного излучения в активной среде.

По этим причинам, исследования кинетических процессов в плазме инертных газов, возбуждаемой осколками деления, содержащей наночастицы плазме представляет значительный научный, а также, вполне возможно, практический интерес.

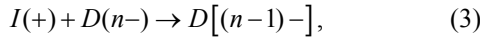
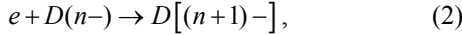
Целями настоящей работы являются: во-первых, создание кинетической модели ядерно-возбуждаемой плазмы инертных газов, содержащей наночастицы; во-вторых, разработка математического аппарата для

расчета необходимых параметров кинетических процессов плазмы инертных газов, возбуждаемой осколками деления, с учетом влияния на эти процессы мелкодисперсных нанокластеров.

Среда, которая была выбрана для моделирования кинетических процессов данной плазмы, – гелий. Сечения взаимодействия электронов и осколков деления с другими компонентами плазмы хорошо известны именно для гелия. Данными соображениями и обусловлен выбор среды. В использованной в данной работе кинетической модели газовой гелиевой среды учитывались следующие компоненты: электроны, атом гелия в основном и четырех нижних возбужденных состояниях, а также атомарный и молекулярный ионы гелия, а также эксимеры гелия. Рассматривались процессы возбуждения и ионизации атомов гелия осколками деления, электронами деградиационного каскада, конверсии атомарных ионов в молекулярные, диссоциативная рекомбинация молекулярных ионов, образование и разрушение эксимеров, а также процессы испускания электромагнитного излучения.

Специфика данной плазмы состоит в том, что наночастицы, попадая в плазму инертных газов, могут существенно влиять на компонентный состав среды. Так как нанокластеры, попадая в плазму инертных газов, в связи с тем, что электроны обладают большей подвижностью, чем ионы, в основном заряжаются отрицательно. Это приводит к тому, что отрицательно заряженные наночастицы притягивают к себе положительно заряженные ионы среды, в результате чего ионы могут прилипать к наночастицам. Также может происходить как разрушение этих ионов, так и процесс гашения возбужденных состояний ионов. В итоге ионный состав плазмы может существенно поменяться. С другой стороны, из-за прилипания электронов к наночастицам, уменьшается концентрация электронов в плазме. Все это может существенно влиять на протекание кинетических процессов в активной среде лазеров с ядерной накачкой и приводить к изменению генерационных характеристик среды.

Кроме реакций между различными компонентами газовой фазы в данной среде, прежде всего, необходимо учитывать взаимодействия многозарядных наночастиц с электронами и положительно заряженными ионами. Это связано с тем, что данные взаимодействия наиболее заметны на компонентный состав плазмы. Эти “плазмохимические” реакции схематично можно представить следующим образом:



Здесь введены обозначения $e, D, D(+), D(n-), I(+)$ - соответственно электрон, электрически нейтральный, положительно и отрицательно заряженные нанокластеры (n – заряд нанокластера в единицах заряда электрона), любой положительно заряженный атомарный или молекулярный ион газовой смеси. Были рассчитаны сечения взаимодействия электронов с нанокластерами и константы скоростей данных реакций (см. табл.1).

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

2.1. Формулы для расчета сечений взаимодействия наночастиц с электронами и констант скоростей реакций нанокластеров с ионами среды

Для расчета сечений взаимодействия было выбрано приближение ограниченного орбитального движения [7]. Для упрощения предполагалось, что нанокластеры имеют сферическую форму с радиусом r . Такая модель была выбрана в связи с тем, что дебаевский радиус, радиус пылевой частицы и длина свободного пробега электронов связаны соотношением $r \ll \lambda_d \ll l_e$.

Сечения взаимодействия пыли с электронами могут быть представлены в следующем виде [3,7,8,9]:

$$\sigma(E_e) = \pi r^2 (1-x)\theta(x), \quad (5)$$

где E_e – энергия электронов; $x = |z| \cdot e^2 / rE_e$; $\theta(x)$ – тета-функция Хевисайда.

Константы же скоростей реакций (3,4) рассчитывались с применением аппроксимационной формулы [10]:

$$k = \frac{x}{1 - \exp(-x)} \cdot \left[1 / \left(\pi r^2 \sqrt{\frac{8T_{ion}}{\pi M_{ion}}} \right) + (1/4\pi Dr) \right]^{-1}, \quad (6)$$

где $x = \frac{|z| \cdot e^2}{rT_{ion}}$, где e – элементарный заряд; T_{ion} – температура среды; M_{ion} – масса иона; z – заряд нанокластера; $D = \mu \cdot T / e$ – коэффициент диффузии;

$\mu = \frac{36}{\sqrt{\beta M}}$ [10,11,12,13] – коэффициент подвижности ионов; β – поляризуемость частицы газа, выраженная в атомных единицах; M – приведенная масса многозарядного иона и частиц газа, выраженная в атомных единицах массы.

2.2. Характерные параметры плазмы, при которых проводился расчет

Расчеты проводились с помощью специально разработанного комплекса программ, аналогичного описанному в [14]. Радиус нанокластера полагался равным 10 нм, коэффициенты прилипания электронов и ионов к нанокластерам были приняты равными единице, при этом учитывались реакции с пылевыми частицами с зарядом до десяти элементарных зарядов ($n = 10$). Давление газа 1 атм, удельная мощность энерговыделения 0,5 кВт/см³. Константы скорости были посчитаны с учетом изменения температуры среды. Учет роста температуры газовой среды не очень важен при коротком импульсе накачки. В частности, при длительности импульса $\tau_{pulse} = 10^{-6}$ с и при типичных значениях мощности удельного энерговыделения, характерных для ядерной накачки газовых сред, содержащих инертные газы (в нашем случае гелий), $P_{beam} = 0.5$ кВт/см³ температура газа возрастает всего до 302 К при начальной температуре среды $T_{gas} = 295$ К, т.е. газ не успевает прогреться настолько, чтобы изменение температуры внесло существенные изменения в константы скоростей ионов с пылевыми частицами. Ситуация существенно меняется, если длительность импульса увеличить примерно до 10^{-4} с.

Был проведен расчет при $\tau_{pulse} = 5 \times 10^{-4}$ с, результаты которого показывают, что температура газовой среды поднялась до 796 К, в результате чего значительно поменялся характер взаимодействий заряженных компонент плазмы инертных газов, возбуждаемой осколками деления, с мелкодисперсными урансодержащими нанокластерами.

2.3. Уравнения, описывающие процесс зарядки наночастиц

Теперь выясним, как именно добавление пылевых частиц влияет на ионный и электронный состав плазмы в условиях характерных для ядерной накачки плотностей удельных мощностей энерговыделения и давлений газа, т.е. рассмотрим процесс формирования квазистационарных состояний плазмы инертных газов, возбуждаемой осколками деления и содержащей пылевые частицы, включая урансодержащие нанокластеры. С применением созданного комплекса программ проведено математическое моделирование кинетических процессов в ядерно-возбуждаемой плазме с учетом наличия в ней нанокластеров. Как уже говорилось, расчеты проводились для нанокластеров радиусом 10 нм при концентрациях до 10^{13} см⁻³. Длительность импульса варьировалась от 1 до 50 мкс. В связи с тем, что заряды пылевых частиц относительно невелики, учтена дискретность процесса зарядки пылевых частиц. Концентрация нанокластеров с зарядом z описывается уравнениями [3,10,15]:

$$\frac{dn_z}{dt} = I_{ion}(z-1)n_{z-1} + I_e(z+1)n_{z+1} - [I_e(z) + I_{ion}(z)]n_z, \quad (7)$$

$$I_e(z) = \gamma_e n_e \int v \sigma_e(v) f_e(v, t) \mathcal{G}(1+x) dv, \quad (8)$$

$$I_{ion}(z) = \frac{x}{\exp(-x) - 1} \cdot \left(\frac{1}{I_0} + \frac{1}{J_0} \right)^{-1}, \quad (9)$$

$$I_0 = \gamma_{ion} 4\pi Dr N_0 e; \quad (10)$$

$$J_0 = \gamma_{ion} \pi r^2 \cdot \sqrt{\frac{8T_{ion}}{\pi M_{ion}}} N_0 e. \quad (11)$$

Здесь $I_{ion}(z)$, $I_e(z)$ - ионный и электронный токи на пылевую частицу с зарядом z , $\gamma_{e(ion)}$ - вероятность того, что электрон (ион), сталкиваясь с пылевой частицей, передает заряд, N_0 - плотность ионов вдали от

нанокластера, v - скорость электронов, $\sigma_e(v)$ - сечение взаимодействия электронов с нанокластерами, n_e - концентрация электронов, $f_e(v, t)$ - функция распределения электронов по скоростям (ФРЭС), t - время, n_z - концентрация нанокластеров с зарядом z .

Таблица 1

Реакции	Константы скорости, $\text{см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$
$He^+ + D^- \rightarrow D + He$	$4.97 \cdot 10^{-6}$
$He^+ + D^{2-} \rightarrow D^- + He$	$9.91 \cdot 10^{-6}$
$He^+ + D^{3-} \rightarrow D^{2-} + He$	$1.49 \cdot 10^{-5}$
$He^+ + D^{4-} \rightarrow D^{3-} + He$	$1.98 \cdot 10^{-5}$
$He^+ + D^{5-} \rightarrow D^{4-} + He$	$2.48 \cdot 10^{-5}$
$He^+ + D^{6-} \rightarrow D^{5-} + He$	$2.97 \cdot 10^{-5}$
$He^+ + D^{7-} \rightarrow D^{6-} + He$	$3.47 \cdot 10^{-5}$
$He^+ + D^{8-} \rightarrow D^{7-} + He$	$3.96 \cdot 10^{-5}$
$He^+ + D^{9-} \rightarrow D^{8-} + He$	$4.46 \cdot 10^{-5}$
$He^+ + D^{10-} \rightarrow D^{9-} + He$	$4.95 \cdot 10^{-5}$
$He_2^+ + D^- \rightarrow D + He + He$	$6.25 \cdot 10^{-6}$
$He_2^+ + D^{2-} \rightarrow D^- + He + He$	$1.24 \cdot 10^{-5}$
$He_2^+ + D^{3-} \rightarrow D^{2-} + He + He$	$1.87 \cdot 10^{-5}$
$He_2^+ + D^{4-} \rightarrow D^{3-} + He + He$	$2.49 \cdot 10^{-5}$
$He_2^+ + D^{5-} \rightarrow D^{4-} + He + He$	$3.11 \cdot 10^{-5}$
$He_2^+ + D^{6-} \rightarrow D^{5-} + He + He$	$3.73 \cdot 10^{-5}$
$He_2^+ + D^{7-} \rightarrow D^{6-} + He + He$	$4.36 \cdot 10^{-5}$
$He_2^+ + D^{8-} \rightarrow D^{7-} + He + He$	$4.98 \cdot 10^{-5}$
$He_2^+ + D^{9-} \rightarrow D^{8-} + He + He$	$5.60 \cdot 10^{-5}$
$He_2^+ + D^{10-} \rightarrow D^{9-} + He + He$	$6.22 \cdot 10^{-5}$

3. ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

На рис.1 представлены результаты расчетов компонентного состава гелиевой плазмы от начальной концентрации пыли

Исходя из этих графиков, можно сделать вывод, насколько добавление нанокластеров влияет на компонентный состав плазмы. Из-за больших размеров пылевых частиц и большой подвижности электронов по сравнению с ионами, нанокластеры начинают интенсивно “выедать” электроны, вследствие чего на пылевые частицы наводится отрицательный заряд, т. е. нанокластеры становятся многозарядными ионами. Это приводит к тому, что отрицательно заряженные пылевые частицы вступают в интенсивные кулоновские взаимодействия с положительно заряженными ионами гелия He^+ и He_2^+ . В результате существенно изменяется компонентный состав ядерно-возбуждаемой плазмы инертных газов.

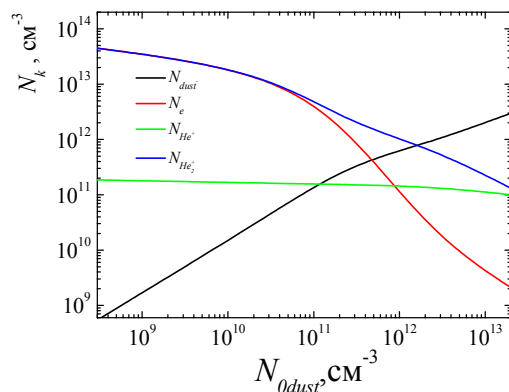


Рис.1. Зависимость концентраций различных компонент плазмы от начальной концентрации нанокластеров: электронов, удельного объема заряда пыли, атомарных и молекулярных ионов гелия

На рис.2 представлены результаты расчетов: распределение зарядов нанокластеров при начальной их концентрации 10^8 см^{-3} . Можно сказать, что чем больше заряд нанокластера, тем труднее пылевой частице взаимодействовать с электронами (с ростом заряда растет порог данной реакции). Напротив, взаимодействие с положительно заряженными ионами становится еще более интенсивным, вследствие чего количество нанокластеров с меньшим зарядом в итоге больше, чем с количеством пылевых частиц с большим зарядом (рис.2).

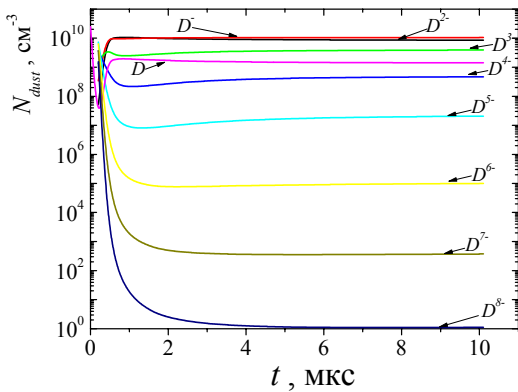


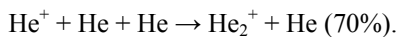
Рис.2. Зависимость концентраций нанокластеров различного заряда от времени при начальной концентрации пыли 10^8 см^{-3}

Так, например, расчеты показали, что при начальной концентрации нанокластеров 10^8 см^{-3} (что в принципе не так уж много) установившееся количество пылевых частиц с зарядом $z = -1$ больше установившегося количества нанокластеров с зарядом $z = -6$ примерно в 10^5 раз (рис.3). Отсюда видно, что заряд пыли относительно невелик (в нашем случае ≈ 10 элементарных зарядов), следовательно, желательно учесть дискретный характер процесса зарядки.

Очевидно, что при образовании многозарядных нанокластеров конкурируют процессы типа (2) и (3), причем процесс (2) имеет пороговый характер (энергия электронов должна быть достаточной, чтобы преодолеть кулоновское отталкивание). Несмотря на это, взаимодействие нанокластеров с электронами очень интенсивно, особенно в начале процесса по причинам, рассмотренным выше.

На рис.3-4 представлены функции распределения электронных состояний в зависимости от энергии электронов. Важно отметить, что она не является максвелловской, т.е. система неравновесная.

Процессы типа (3) довольно сильно влияют на наличие в плазме ионов He_2^+ , но не на количество ионов He^+ . Объясняется это тем, что основным каналом образования ионов He^+ является реакция $\text{He} + e \rightarrow \text{He}^+ + e$. Количество ионов He^+ , образованных по этому каналу составляет почти 100% от всех образованных ионов He^+ , т.е. другие каналы образования ионов He^+ можно не учитывать. При этом убыль ионов He^+ осуществляется в основном по каналу



Таким образом, каналы типа (3) дают незначительный вклад в потери ионов He^+ , т.е. нанокластеры слабо влияют на изменение концентрации ионов He^+ в плазме инертных газов, возбуждаемой осколками деления (рис.5).

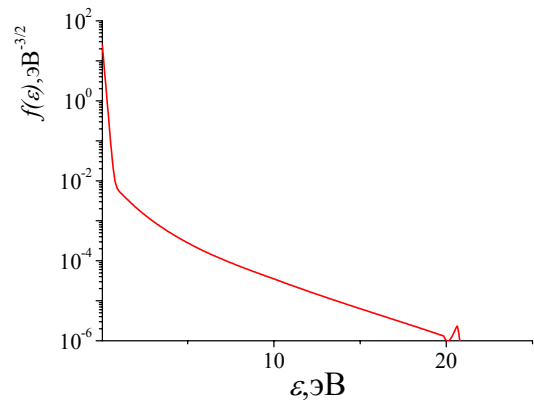


Рис.3. ФРЭС при начальной концентрации нанокластеров 10^{12} см^{-3}

Максимальный вклад в убыль ионов He^+ в реакциях с участием нанокластеров дает реакция $\text{D}^2 + \text{He}^+ \rightarrow \text{D}^- + \text{He}$. Этот канал дает вклад в потери ионов $\text{He}^+ \approx 7\%$. Другая ситуация с образованием ионов He_2^+ . По результатам численного эксперимента каналы типа (3) дают вклад в потери ионов $\text{He}_2^+ \approx 90\%$, что может сильно менять кинетику процессов в активных лазерных средах, содержащих гелий (например He-Cd , He-N_2), в которых процесс перезарядки молекулярного иона гелия вносит существенный вклад в заселение верхнего лазерного уровня.

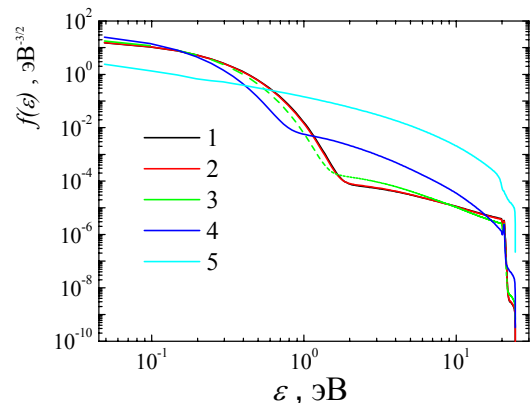


Рис.4. Функции распределения электронов по энергиям при различных концентрациях нанокластеров: 1 - 10^8 см^{-3} , 2 - 10^{10} см^{-3} , 3 - 10^{11} см^{-3} , 4 - 10^{12} см^{-3} , 5 - 10^{13} см^{-3}

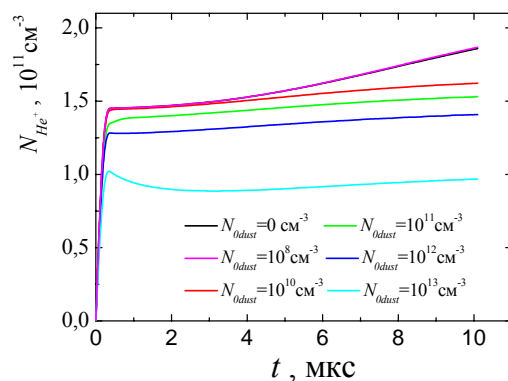


Рис.5. Зависимость концентрации ионов He^+ от времени при различных начальных концентрациях нанокластеров

4. РАСЧЕТ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РАЗМЕРАХ НАНОКЛАСТЕРОВ

При исследовании кинетических процессов в гелиевой ядерно-возбуждаемой плазме, содержащей нанокластеры соединений урана, представляется целесообразным изучить влияние нанокластеров различных размеров на компонентный состав данной среды. Было проведено математическое моделирование кинетических процессов, содержащих нанокластеры соединений урана размерами 10, 20, 50 и 100 нм. Из результатов расчетов, представленным на рис.6–9, можно сделать вывод насколько увеличение размеров нанокластеров соединений урана влияет на компонентный состав гелиевой ядерно-возбуждаемой плазмы.

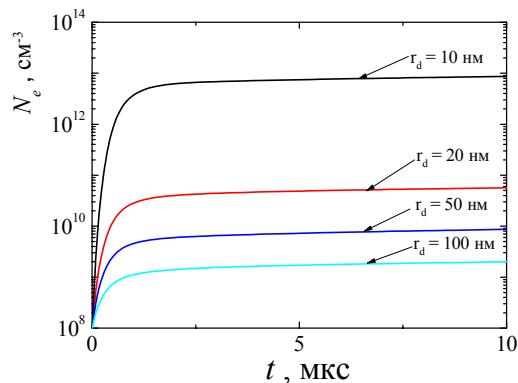


Рис.6. Квазистационарные концентрации электронов при различных размерах пылевых частиц

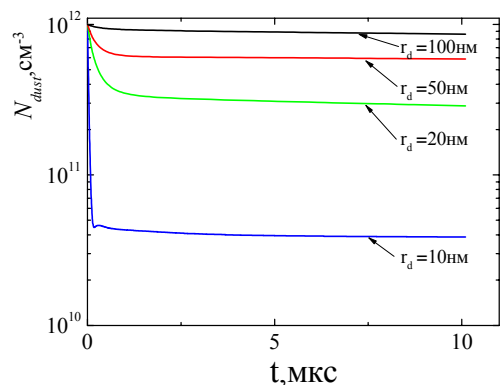


Рис.7. Квазистационарные концентрации нанокластеров при различных размерах пылевых частиц

С увеличением размеров нанокластеров взаимодействие пылевых частиц с компонентами плазмы усиливается (рис.6–7). Это приводит к тому, что на пылевые частицы наводится еще больший заряд, вследствие чего нанокластеры очень интенсивно взаимодействуют с ионами среды (рис.8–9).

Все это может существенно отразиться на протекании кинетических процессов в ядерно-возбуждаемой плазме инертных газов и влиять на генерационные характеристики среды.

Кроме того, увеличение размеров наночастиц приводит к росту заряда пылевых частиц вследствие более интенсивного характера взаимодействия многозарядных наночастиц с другими заряженными компонентами плазмы. Были проведены расчеты для наночастиц различных размеров. На рис.10–11 представлены результаты расчетов для наночастиц размерами 100 и 200 нм соответственно.

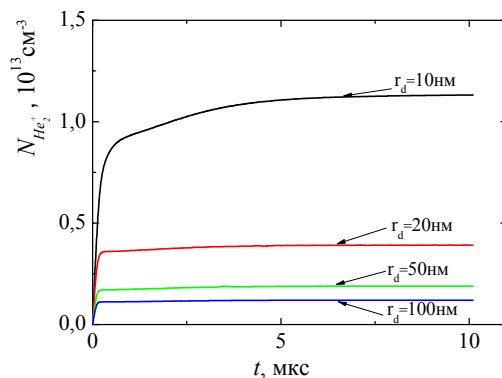


Рис.8. Квазистационарные концентрации молекулярных ионов гелия при различных размерах пылевых частиц

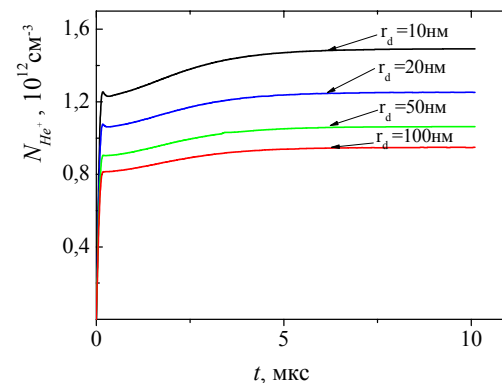


Рис.9. Квазистационарные концентрации атомарных ионов гелия при различных размерах пылевых частиц

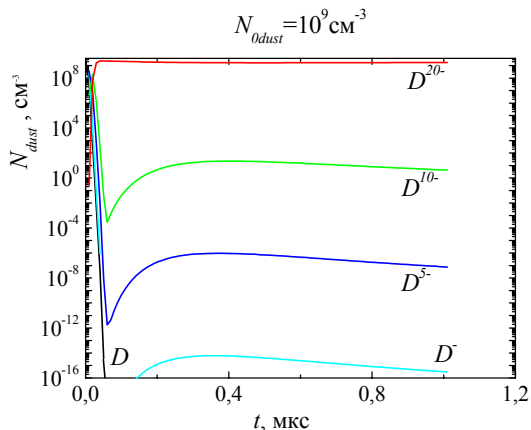


Рис.10. Квазистационарные концентрации наночастиц размерами 100 нм различного заряда от времени при начальной концентрации наночастиц 10^9 см^{-3}

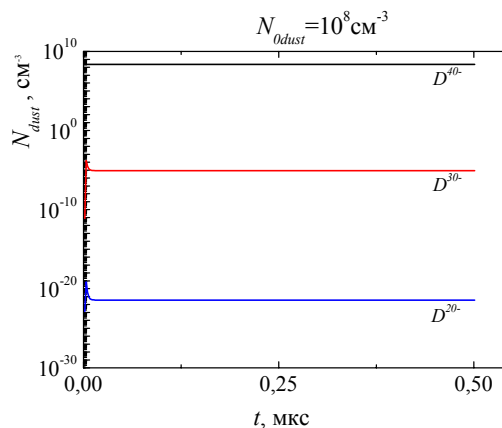


Рис.11. Квазистационарные концентрации наночастиц размерами 200 нм различного заряда от времени при начальной концентрации наночастиц 10^8 см^{-3}

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, насколько с увеличением размеров мелко-дисперсных частиц растет заряд пыли. Для пылевых частиц размерами 100 нм максимальный заряд достигает 20 элементарных зарядов, а для частиц размерами 200 нм максимальный заряд достигает уже 40 элементарных зарядов. Для сравнения максимальный заряд пылевых частиц размерами 10 нм составляет всего несколько элементарных зарядов.

Можно предположить, что с дальнейшим увеличением размеров пылевых частиц будет расти и их заряд. В этом случае дискретность процесса зарядки мелко-дисперсных частиц можно не учитывать.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении еще раз коротко представим основные результаты данных исследований.

Была разработана кинетическая модель ядерно-возбуждаемой газовой гелиевой плазмы, содержащей наночастицы.

Разработан специальный комплекс программ, позволяющий адекватно рассчитывать кинетику ядерно-возбуждаемой плазмы инертных газов, содержащей нанокластеры.

Проведено самосогласованное математическое моделирование кинетических процессов в гелии, возбуждаемом осколками деления урана с учетом влияния на эти процессы пылевых частиц при различных концентрациях и различных размерах наночастиц. Также была впервые учтена дискретность процесса зарядки наночастиц.

Расчеты показали, что наличие в ядерно-возбуждаемой газовой гелиевой плазме пылевых частиц приводит к значительному изменению компонентного состава такой плазмы. Это, в свою очередь, может отражаться на кинетике процессов в лазерно-активных средах и может существенно влиять на генерационные характеристики активных сред лазеров с ядерной накачкой, в которых присутствует гелий.

Также были проведены расчеты для пылевых частиц различных размеров. Результаты данных расчетов показали насколько увеличение размеров пылевых частиц влияет на компонентный состав гелиевой ядерно-возбуждаемой плазмы, а также насколько увеличение размеров наночастиц влияет на рост заряда пыли.

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

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ФРЭС — функция распределения электронов по скоростям
 λ_d — дебаевский радиус, м;
 r — радиус нанокластера, м;
 $l_{i(e)}$ — длина пробега иона(электрона), м;
 k_i — константа скорости физико-химического процесса, м³/с;
 P_{beam} — удельная мощность энерговклада, Вт/см³;
 T_{gas} — температура газа, К;
 t — время, с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мешакин В.И., Будник А.П. Оптические свойства наночастиц, образующихся при распылении покрытий лазерных элементов осколками деления // Препринт ФЭИ-3065. Обнинск. 2006. 15с.
2. Мешакин В.И., Будник А.П. Поглощение оптического излучения в газе, содержащем нанокластеры распыленного металлического урана и его оксидов // Доклад на международной конференции «VIII Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии». – Саров, 21-24 марта 2006. ИПК ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ». С. 472-477.
3. Алексеева И.В., Будник А.П., Исакова В.Н., Мешакин В.И., Свинын И.Р., Сипачев А.В., Тупчиев В.А. Теоретическая модель кинетических процессов в плазме инертных газов, возбуждаемой осколками деления урана, с учетом влияния на эти процессы пылевых частиц. Труды регионального конкурса научных проектов в области общественных наук. Вып. 10. Калуга: Издательство "Полиграф-Информ". 2006. С. 127-133.
4. Miley G.H., McArthur D., DeYuong R., Prelas M. Fission reactor pumped laser: History and prospects. // Proceedings Conferences 50 Years with nuclear fission. Washington 25-28 April pp.333-342. Pub. American Nuclear Society. 1989.
5. Prelas M.A., Boody F.P., Zideer M. A direct energy conversion technique based on an aerosol core reactor concept. // IEEE Publication Number: 84CH1958-8, P. 8. 1984.
6. Prelas M.A., Romero J., Pearson E. A critical review of fusion system for radiolytic conversion of inorganics to gaseous fuels. // Nuclear Technology and Fusion. V. 2. N. 2. P. 143. 1982.
7. Фортвов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А., Молотков В.И., Петров О.Ф. Пылевая плазма // УФН. 2004. Т. 174. №5. С. 495-544.
8. Fortov V.E., Rykov V.A., Budnik A.P., Filinov V.S., Deputatova L.V., Rykov K.V., Vladimirov V.I., Molotkov V.I., Zrodnikov A.V., Dyachenko P.P. Experimental and theoretical investigations of dust crystals in plasma created by proton beam // Phys. Lett. A 351 (2006) 296–301.
9. Цытович В.Н., Морфил Г.Е., Томас Х. Комплексная плазма: II элементарные процессы в комплексной плазме // Физика плазмы 28 675(2002)
10. Смирнов Б.М. Аэрозоли в газе и плазме - Учебное пособие.- М.: ИВТАН, 1990, 104с.
11. Смирнов Б.М. Ионы и возбужденные атомы в плазме. М.: Атомиздат, 1974, 45с.
12. Физические величины. Справочник. Под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. Энергоатомиздат. М.: 1991. 1232с.
13. Райзер Ю.П. Физика газового разряда М., Наука, 1992, 536с.
14. Дятко Н. А., Кочетов И. В., Напартович А. П. Функция распределения электронов по энергии в распадающейся плазме азота // Физика плазмы. 1992. Т.18. Вып. 7. С.888–900
15. Matsoukas T., Russel M. Particle charging in low-pressure plasmas // J. Appl. Phys. 77 4285 (1995).