
Лавинно-стримерный переход

Пек Борис

Постановка задачи

- Обобщение результатов моделирования стримеров в газовой смеси азота и кислорода, полученных на семинарах в прошлом семестре.
- Рассмотрены модели стримера в однородном и неоднородном полях.

Общие параметры моделей

Газовая смесь: 76% N₂ и 24% O₂. В модели учитывались следующие реакции (всего 45):

Для азота:

- Упругое столкновение N₂ с электроном
- Ионизация молекулярного азота: 15.64 эВ
- Диссоциативная рекомбинация молекулярного иона в основное состояние: -5.85 эВ
(N₂⁺ + e → 2N)
- Диссоциация молекулы азота: 9.8 эВ
- 8 реакций возбуждения электронных уровней [эВ]:
6.17, 7, 7.35, 7.36, 7.8, 8.16, 8.4, 8.55
- 8 реакций возбуждения колебательных уровней [эВ]:
0.29, 0.59, 0.88, 1.17, 1.47, 1.76, 2.06, 2.35

Ион-ионная рекомбинация:

- O₂⁺ + O⁻ → O₂ + O
- O₂⁺ + O₂⁻ → 2O₂
- O₂⁻ + N₂⁺ → O₂ + N₂
- O⁻ + N₂⁺ → O + N₂

Отлипание:

- O + O⁻ → O₂ + e
- O⁻ + O₂^{*} → O₂ + O + e
- O₂ + O₂⁻ → 2O₂ + e
- O₂^{*} + O₂⁻ → 2O₂ + e

Для кислорода:

- Упругое столкновение O₂ с электроном
- Ионизация молекулярного кислорода: 12.1 эВ
- Диссоциативная рекомбинация молекулярного иона в основное состояние: -6.97 эВ
(O₂⁺ + e → 2O)
- Диссоциация молекулы кислорода: 5.17 эВ
(O₂ + e → 2O + e)
- 5 реакций возбуждения электронных уровней [эВ]:
0.98, 1.63, 4, 6.17, 9.96
- 4 реакции возбуждения колебательных уровней [эВ]:
0.193, 0.383, 0.57, 0.754
- Прилипание: -0.5, 3.64 и -0.5 эВ
(2O₂ + e → O₂ + O₂⁻)
(O₂ + e → O + O⁻)
(O₂ + N₂ + e → O₂⁻ + N₂)

Система уравнений

CFD-ACE – конечноэлементный пакет, решающий плоские, осесимметричные и трехмерные задачи.

Для решения задач о разрядных процессах в газах использовалась следующая система уравнений, решаемых совместно:

Уравнение Пуассона для электрического потенциала φ с учетом объемного заряда.

$$\Delta\varphi = \frac{1}{\varepsilon\varepsilon_0} \left(\sum_i q_i Y_i \frac{\rho_{газ}}{m_i} + q_e n_e \right)$$

Уравнения Нернста-Планка для ионов, атомов и молекул. Y_i – массовая доля i -го типа частиц.

$$\frac{\partial Y_i}{\partial t} + \text{div}(\mu_i Y_i \nabla \varphi - D_i \nabla Y_i) = S_i$$

Кинетическое уравнение для электронов в приближении энергетического спектра.

Через функцию распределения по координатам и энергии f_0 выражается концентрация электронов n_e .

$$\left\{ \begin{array}{l} V \frac{\partial f_0}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\chi \left(\nabla f_0 + \nabla \varphi \frac{\partial f_0}{\partial E} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial E} \left[\chi \nabla \varphi \cdot \left(\nabla \varphi \frac{\partial f_0}{\partial E} + \nabla f_0 \right) \right] = VS \\ \vec{f}_1 = -\frac{V}{v} \nabla f_0 - (\nabla \varphi) \frac{V}{v} \frac{\partial f_0}{\partial E} \\ \chi = \frac{V^3}{3v} \\ E = \frac{m_e V^2}{2e} \end{array} \right.$$

Функции источника кинетического уравнения для реакций ионизации, рекомбинации и возбуждения.

$$\begin{aligned} S_{ion} &= -v_{ion}(E)f_0(E, \vec{r}, t) + 2v_{ion}(2E + u_{ion})f_0(2E + u_{ion}, \vec{r}, t) \\ S_{det} &= \delta(E)I_{det}(\vec{r}, t) \\ S_{rec} &= -v_{rec}(E)f_0(E, \vec{r}, t) & S_{adh} &= -v_{adh}(E)f_0(E, \vec{r}, t) \\ S_{exc} &= -v_{exc}(E)f_0(E, \vec{r}, t) + v_{exc}(E + u_{exc})f_0(2E + u_{exc}, \vec{r}, t) \end{aligned}$$

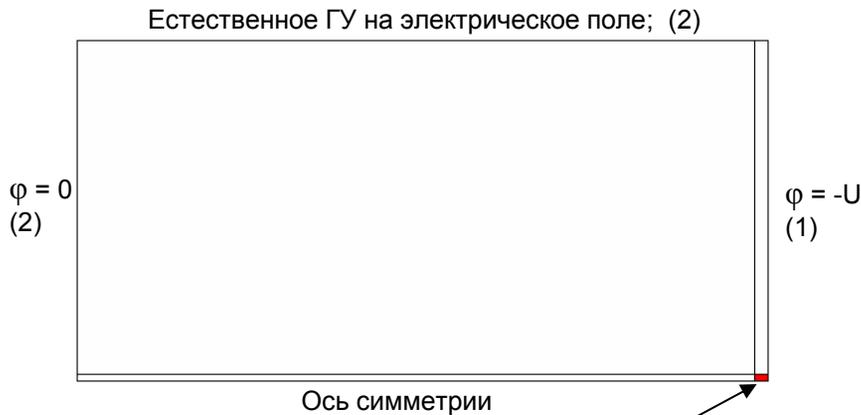
Модели

В однородном поле

Размеры цилиндрической области:

- радиус – 0.5 мм
- длина – 1.02 мм

Температура атомов и молекул: 300 К.



Начальные условия:

- Концентрация электронов 10^{16} 1/м^3 в небольшой (10x20мкм) области возле катода.
- В остальной части модели начальная концентрация электронов нулевая.

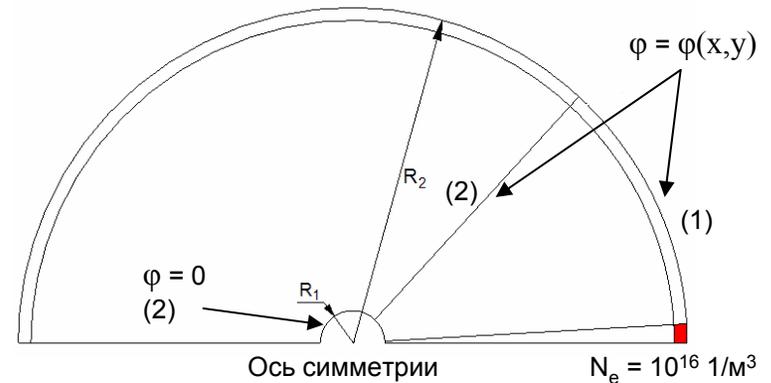
Решено 2 задачи:

- $U = 5 \text{ кВ} \Rightarrow E_{\text{ср}} \approx 49 \text{ кВ/см}$
- $U = 10 \text{ кВ} \Rightarrow E_{\text{ср}} \approx 98 \text{ кВ/см}$

В неоднородном поле

Система электродов: сфера-сфера

Температура атомов и молекул: 300 К. Начальные условия аналогичны модели с однородным полем. Лавина и стример распространяются лишь в узкой области вблизи оси симметрии, и можно рассчитывать сектор круга вместо полного сечения.



$$\varphi(x, y) = U \cdot \left(\frac{R_1}{\sqrt{x^2 + y^2}} - 1 \right)$$

Аналитическая формула распределения потенциала от заряженной сферы.

Решено 2 задачи:

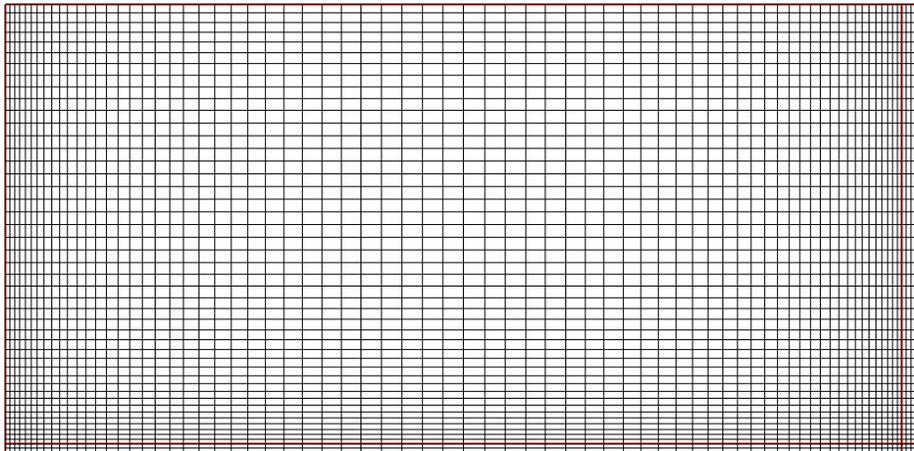
- $R_1 = 1 \text{ мм}, R_2 = 2.01 \text{ мм}, U = 10 \text{ кВ} \Rightarrow E_{\text{ср}} \approx 49.5 \text{ кВ/см}, K \approx 2$
- $R_1 = 50 \text{ мкм}, R_2 = 520 \text{ мкм}, U = 2 \text{ кВ} \Rightarrow E_{\text{ср}} \approx 38 \text{ кВ/см}, K \approx 10$

Здесь K – коэффициент неоднородности поля.

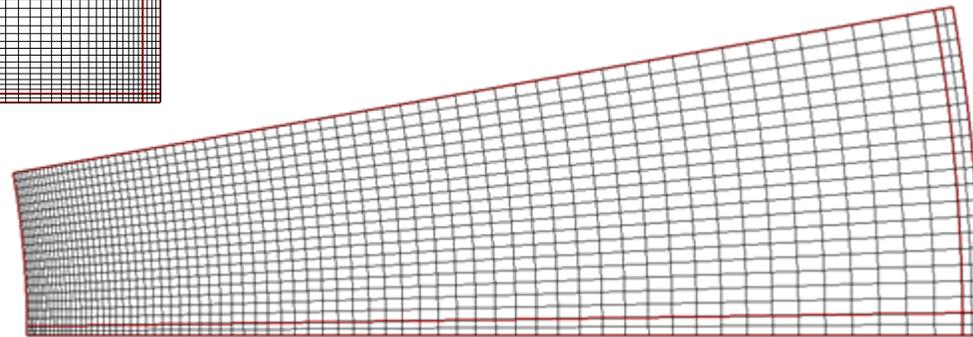
ГУ на ФР электронов по энергиям: (1) $f_0(E) = \exp\left(-\frac{E}{0.1}\right)$

(2) $\frac{\partial f_0}{\partial n} = 0$

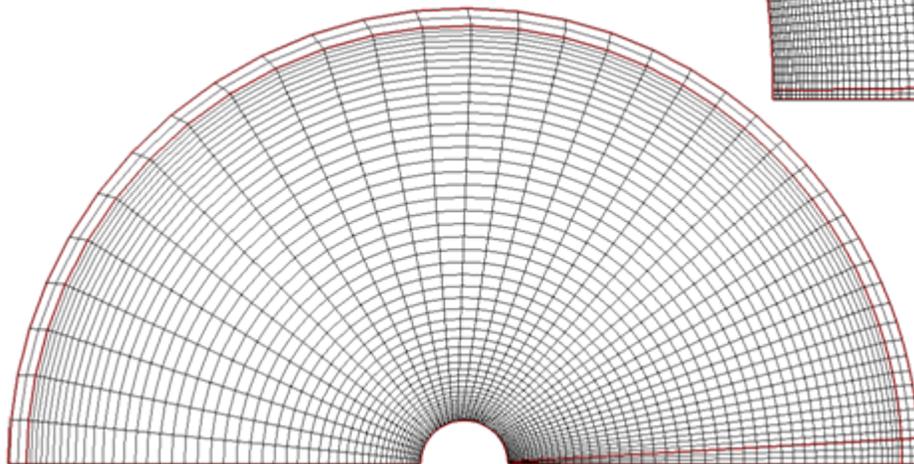
Расчетные сетки



0.5 x 1.02 мм
Элементов: 3358
Узлов: 3478



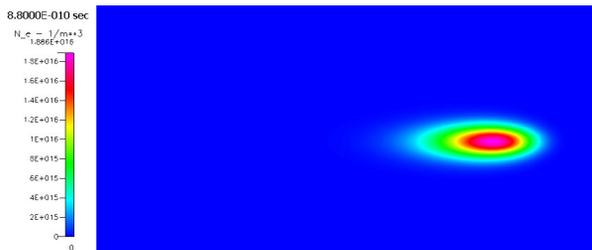
$R_1 = 1 \text{ мм}$
 $R_2 = 2.01 \text{ мм}$
Элементов: 1491
Узлов: 1584



$R_1 = 50 \text{ мкм}$
 $R_2 = 0.52 \text{ мм}$
Элементов: 2142
Узлов: 2236

Концентрация электронов, распределения заряда и электрического поля

0.8800 нс



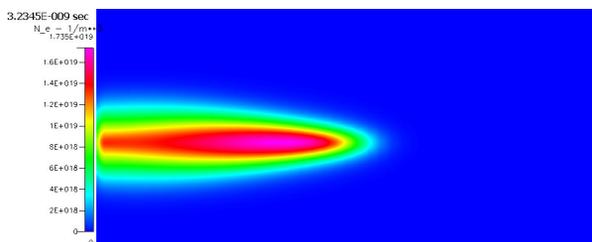
0.8800 нс



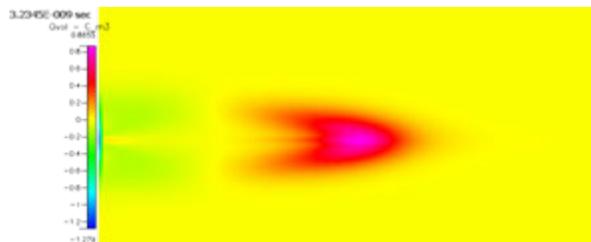
0.8800 нс



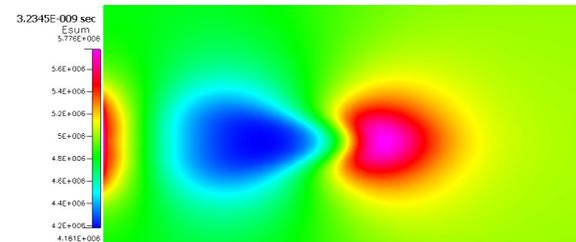
3.2345 нс



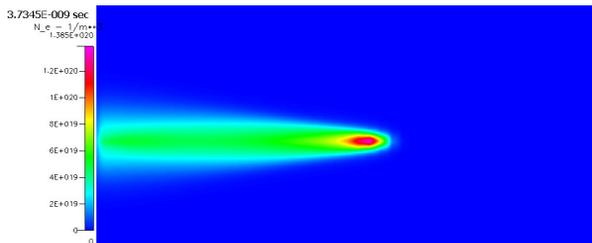
3.2345 нс



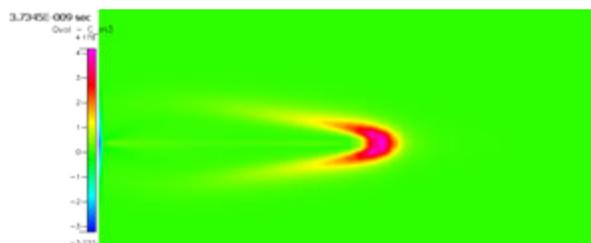
3.2345 нс



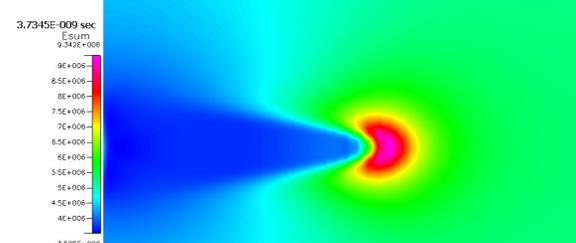
3.7345 нс



3.7345 нс



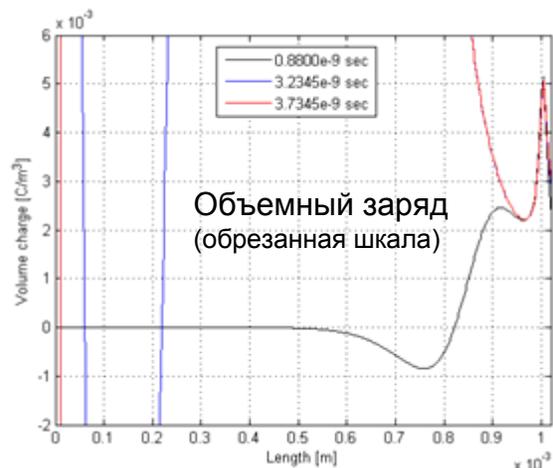
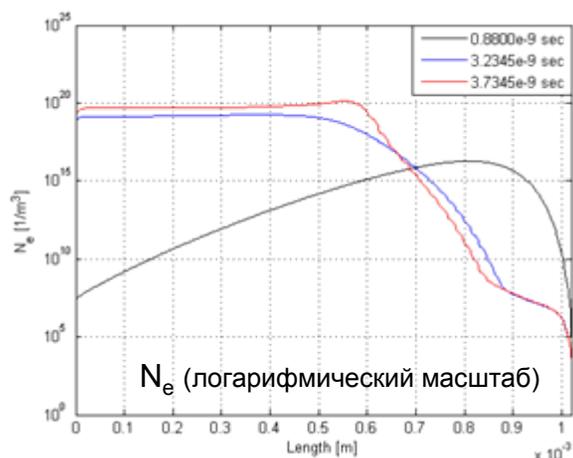
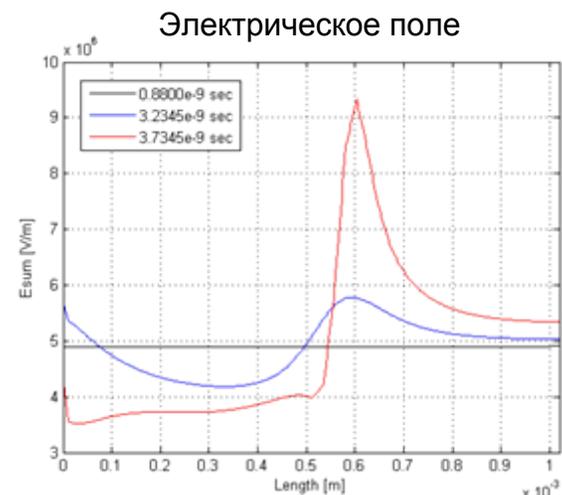
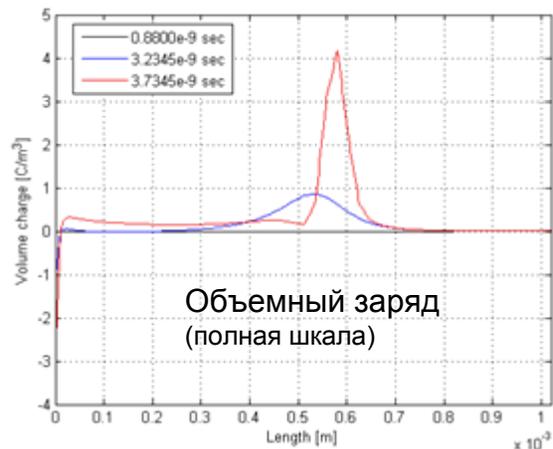
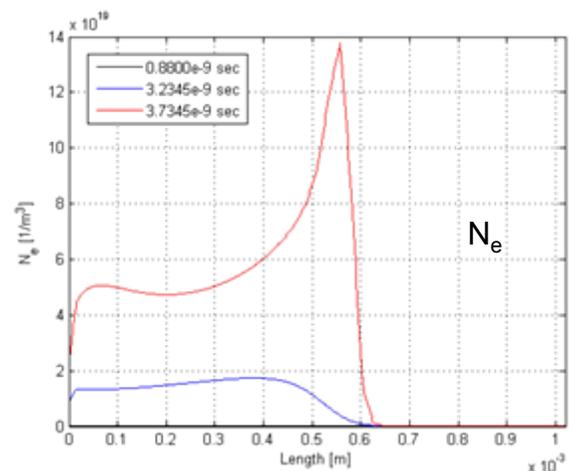
3.7345 нс



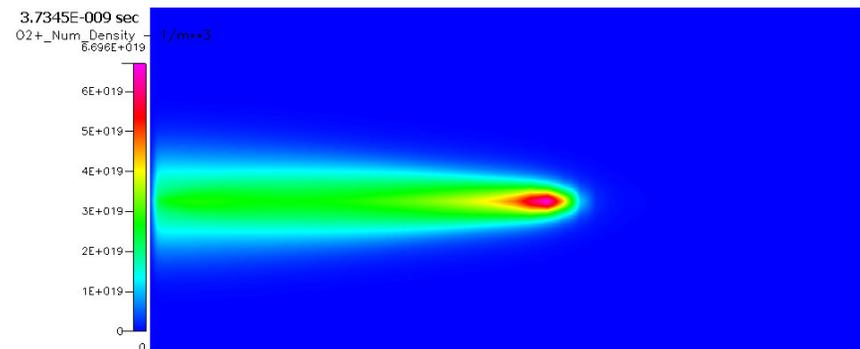
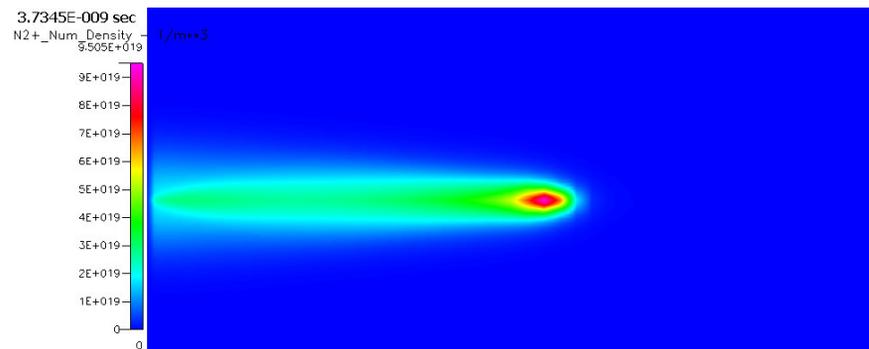
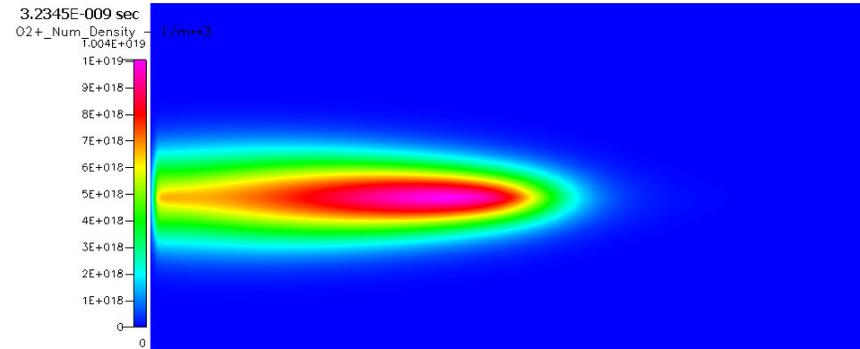
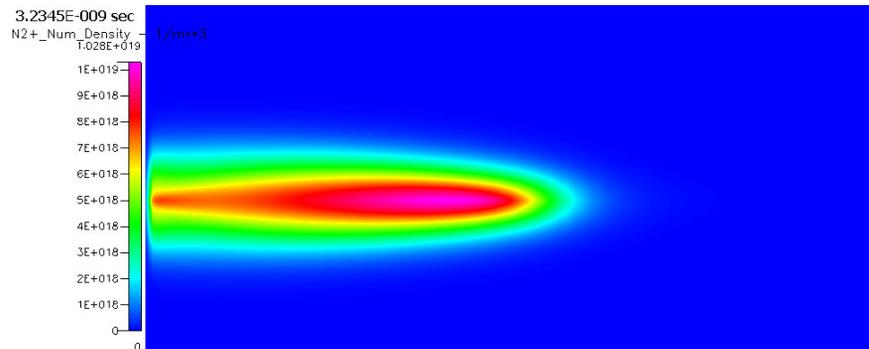
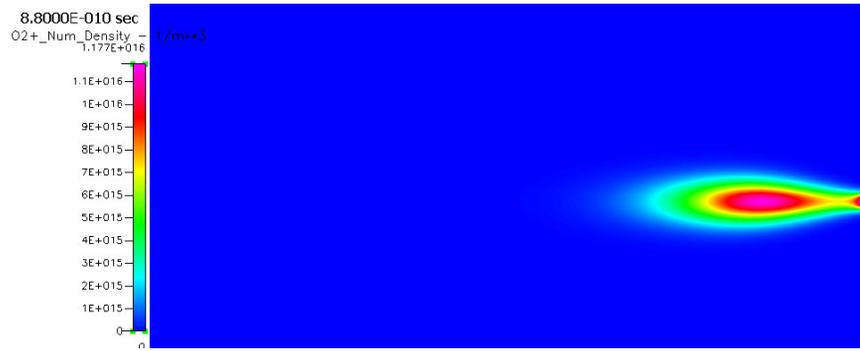
U = 5 кВ

Задача 1

Концентрация электронов, распределения заряда и электрического поля (линейные графики вдоль оси симметрии)



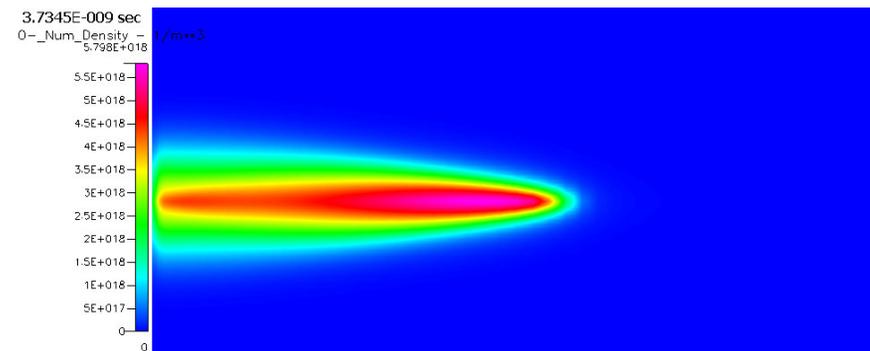
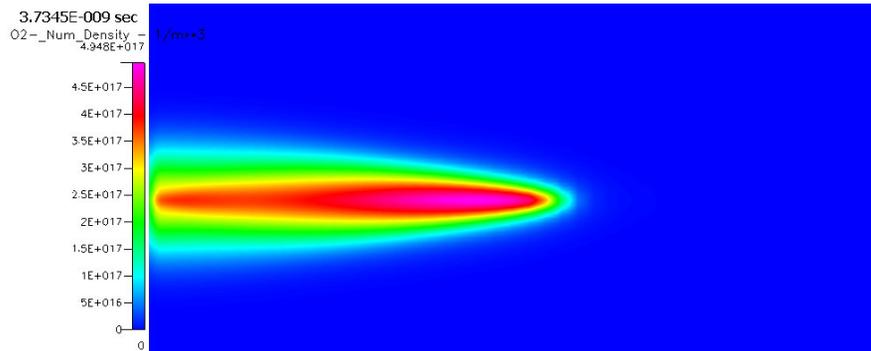
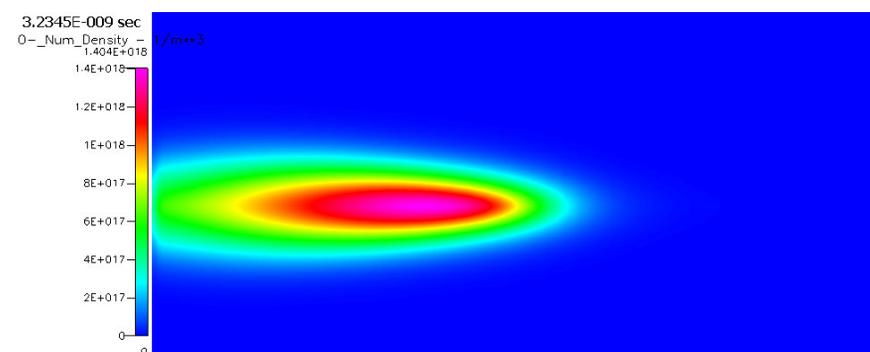
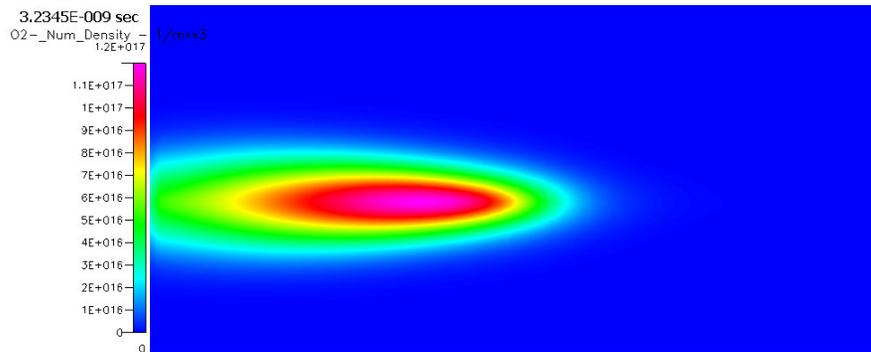
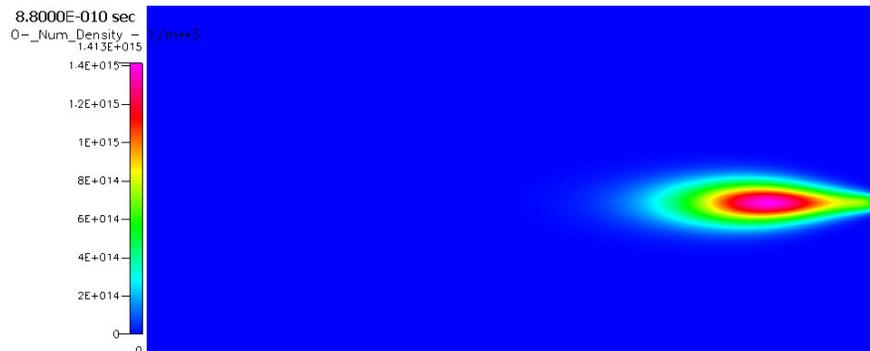
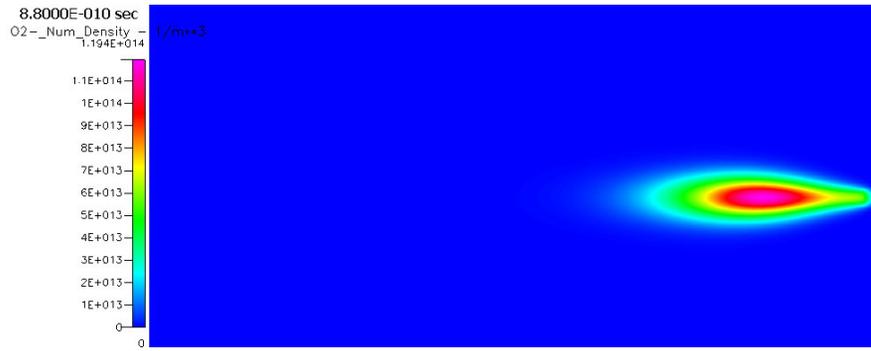
Концентрация положительных ионов N_2^+ и O_2^+



U = 5 кВ

Задача 1

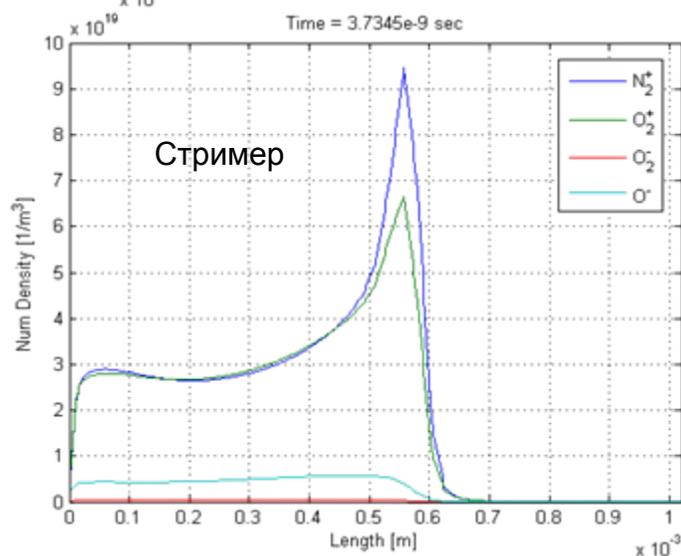
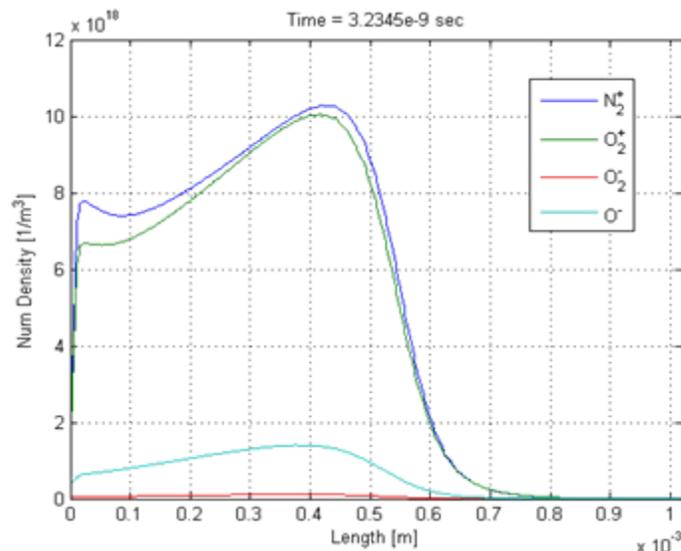
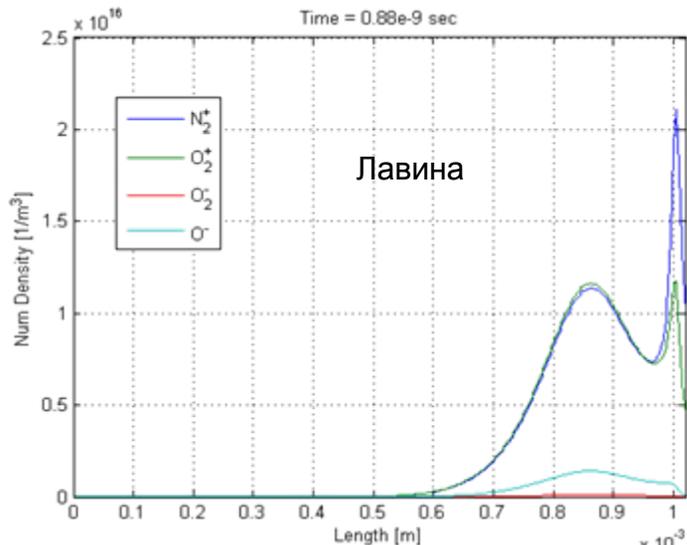
Концентрация отрицательных ионов O_2^- и O^-



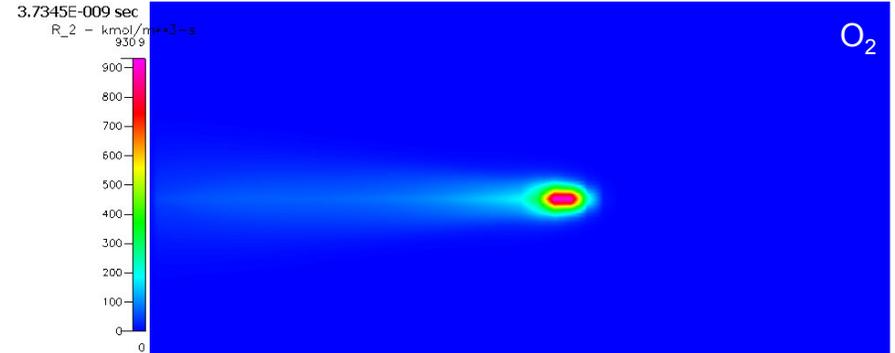
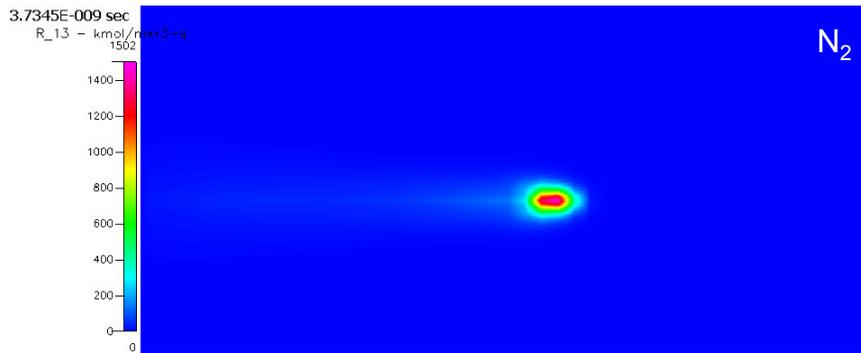
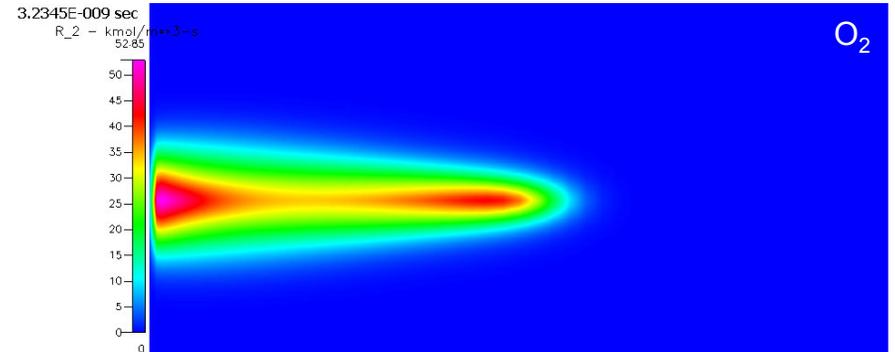
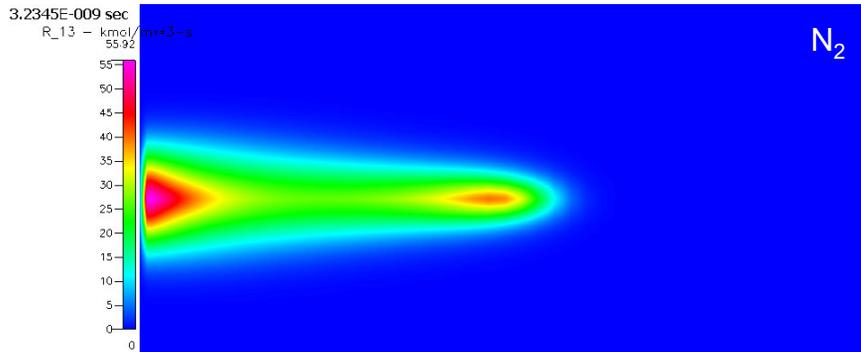
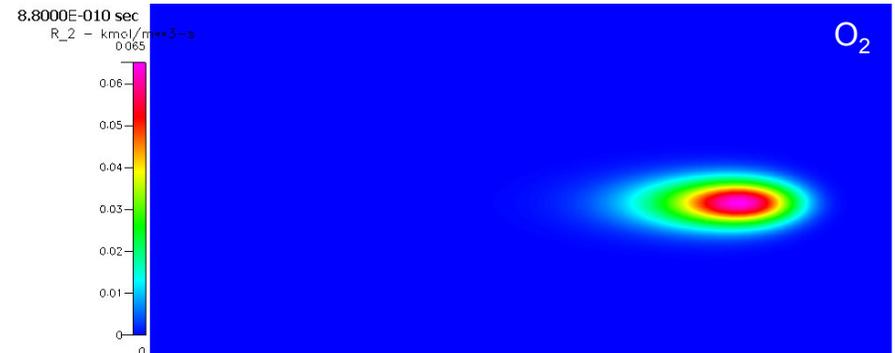
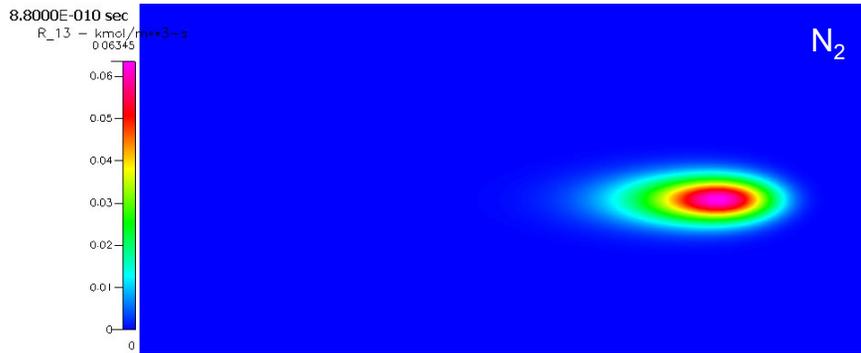
U = 5 кВ

Задача 1

Концентрация ионов N_2^+ , O_2^+ , O_2^- и O^-



Интенсивности ионизации N_2 и O_2

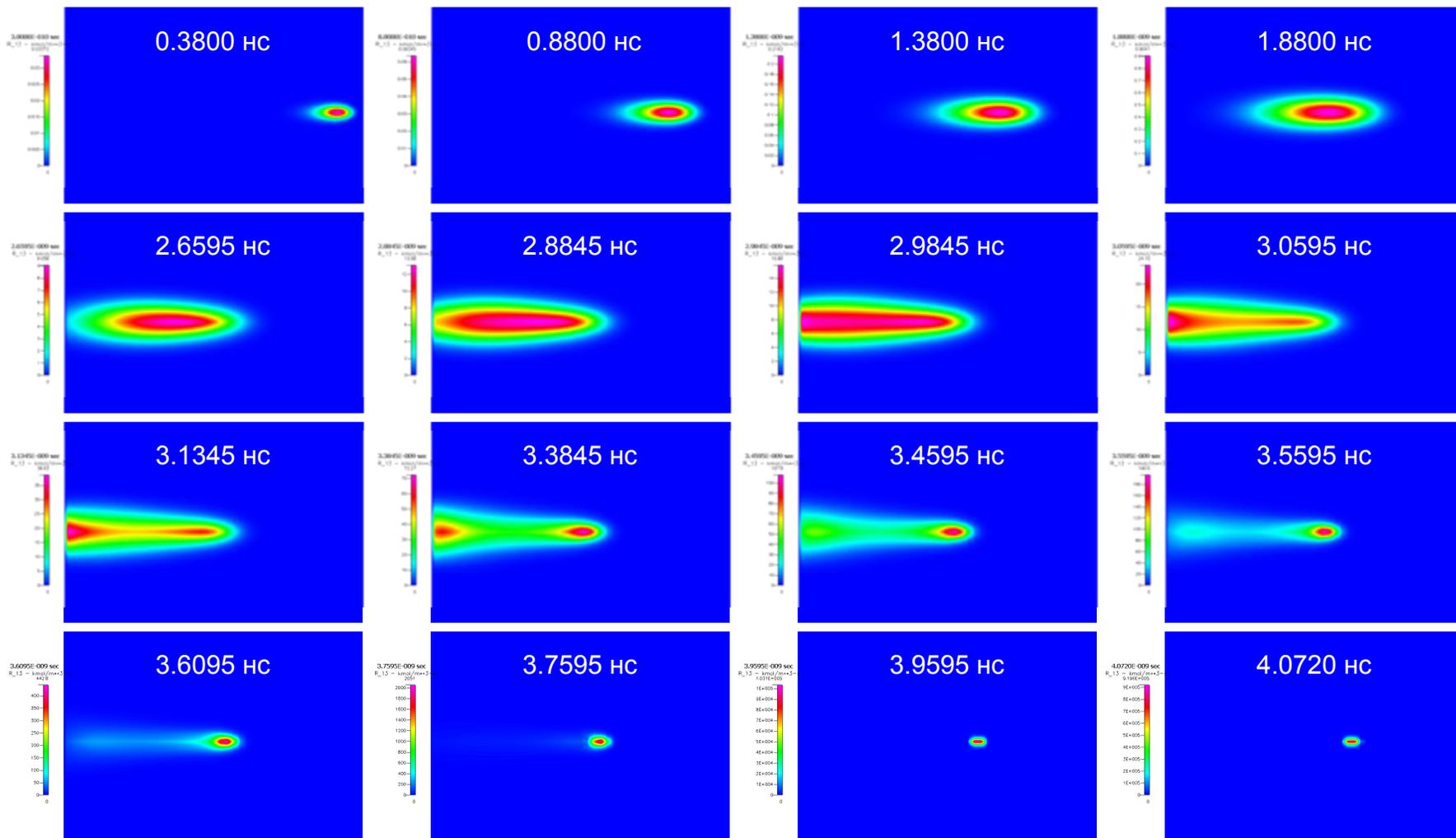


U = 5 кВ

Задача 1

Интенсивность ионизации N_2

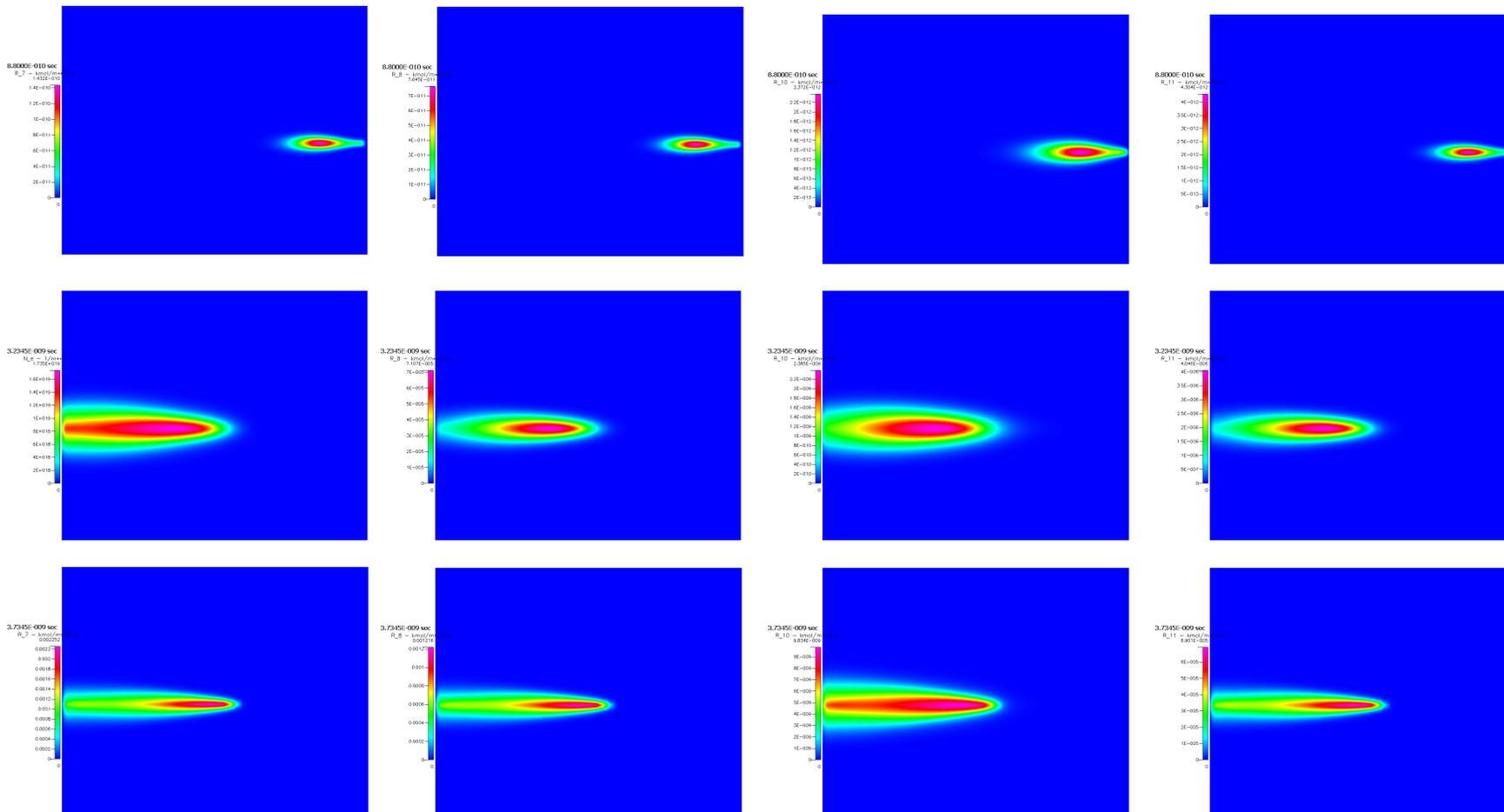
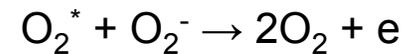
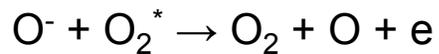
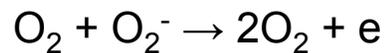
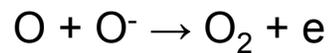
Серия контурных графиков в разные моменты времени для более подробного анализа процесса лавинно-стримерного перехода.



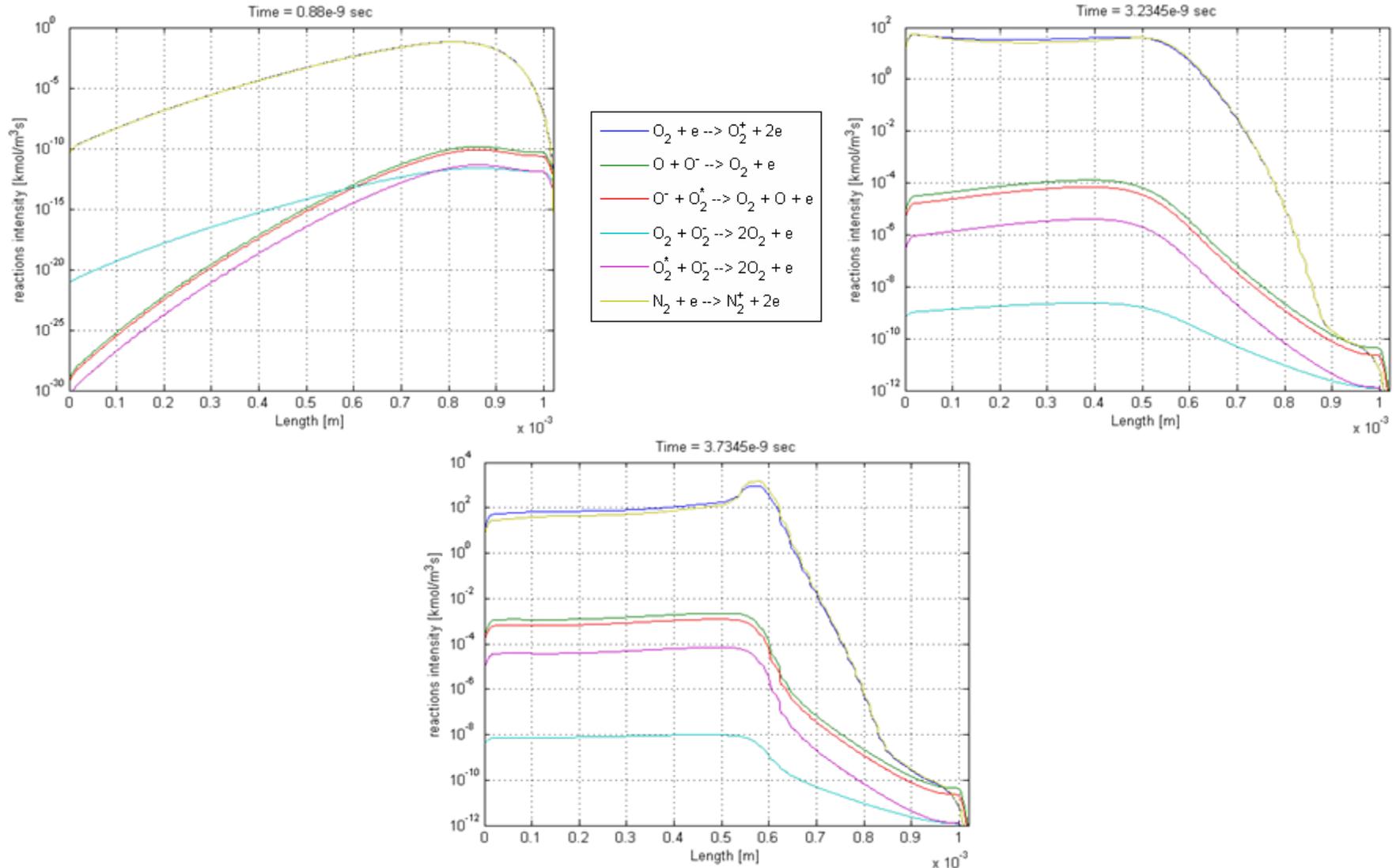
$U = 5$ кВ

Задача 1

Интенсивности реакций отлипания



Интенсивности реакций ионизации и отлипания



U = 5 кВ

Задача 1

Интенсивность свечения

$$I = const \cdot \sum_i R_i E_i$$

I – интенсивность свечения [Вт/см³]

i – номер реакции возбуждения

R_i – интенсивность реакции возбуждения [кмоль/м³ с]

E_i – энергия реакции возбуждения [эВ]

$const$ – размерная константа

$$const = 6.02e26 * 1.6e-19 * 1e-6$$

6.02e26 кмоль → 1

1.6e-19 эВ → Дж

1e-6 м³ → см³

E_i в инфракрасном диапазоне [эВ]:

0.193, 0.29, 0.383, 0.57, 0.59, 0.754, 0.88, 0.98

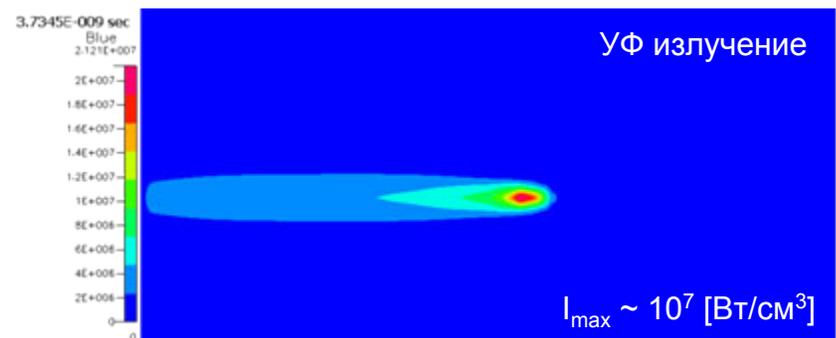
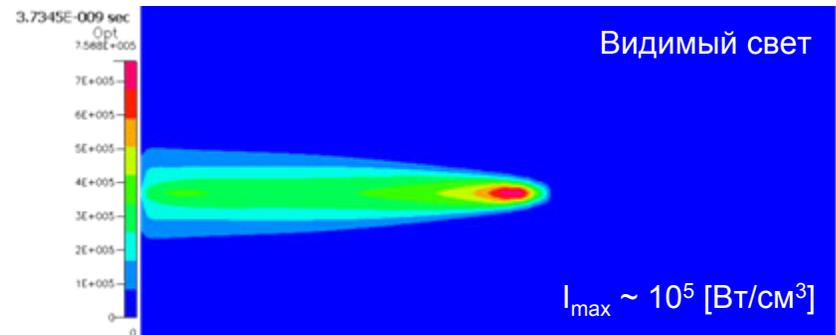
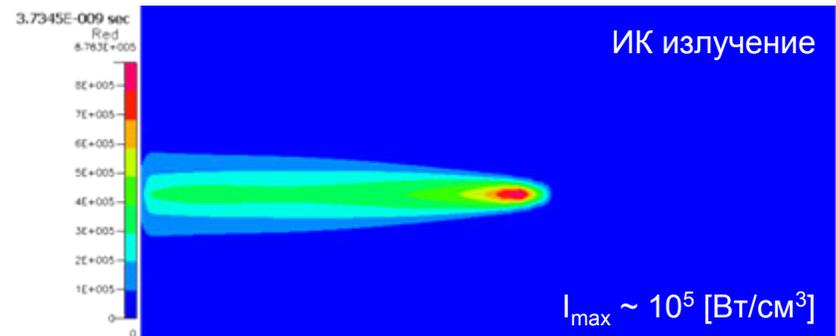
E_i в оптическом диапазоне [эВ]:

1.17, 1.47, 1.63, 1.76

E_i в ультрафиолетовом диапазоне [эВ]:

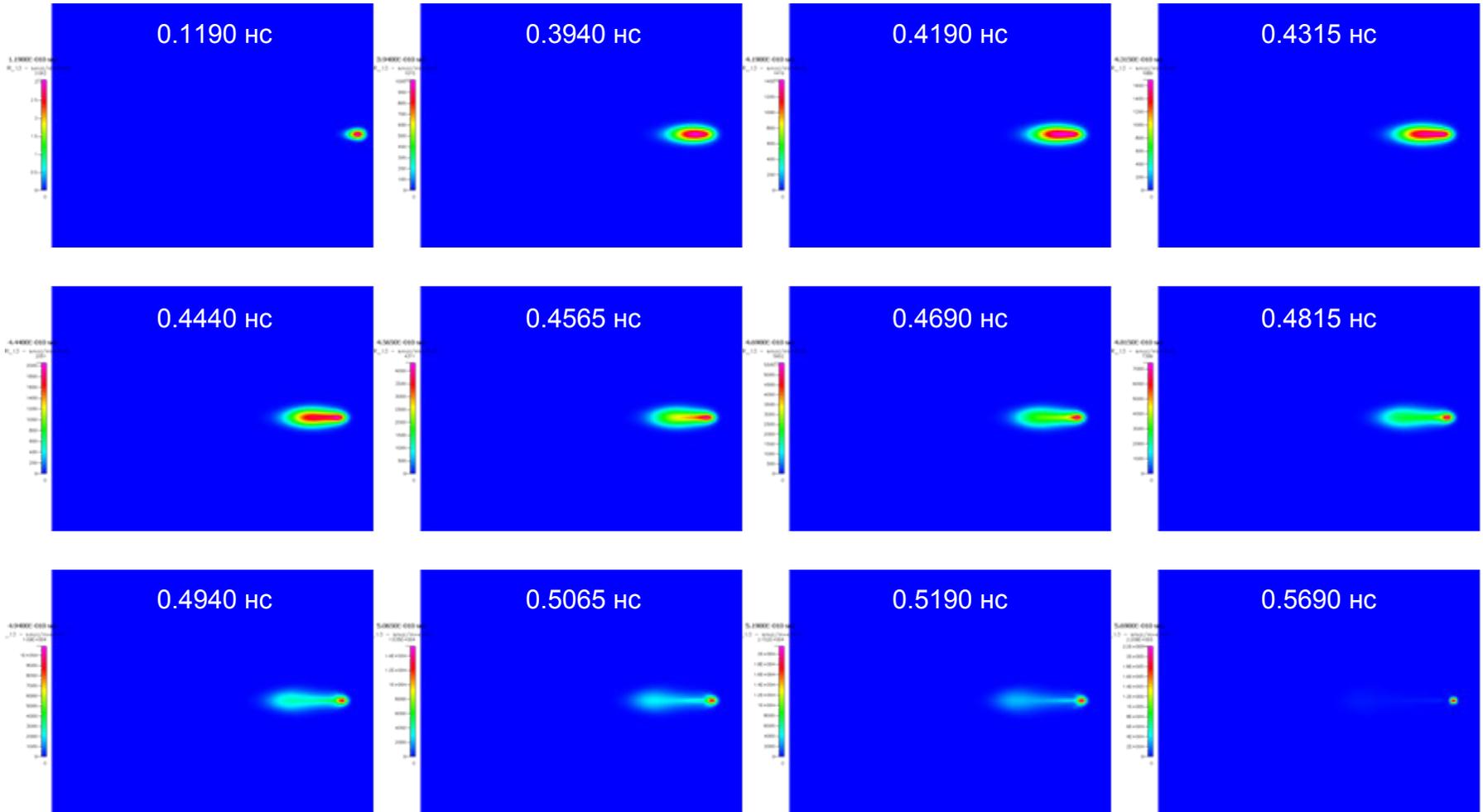
2.06, 2.35, 4, 6.17, 6.19, 7, 7.35, 7.36, 7.8,
8.16, 8.4, 8.55, 9.96, 11

Реакции перехода возбужденных частиц в основное состояние в модели не учитывались, поэтому для анализа используются реакции возбуждения.



Интенсивность ионизации N_2

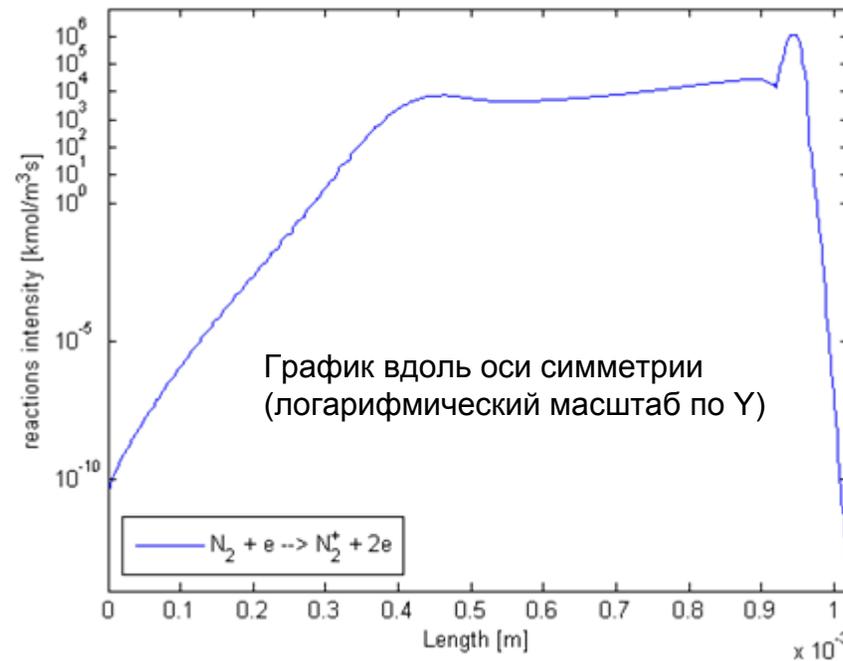
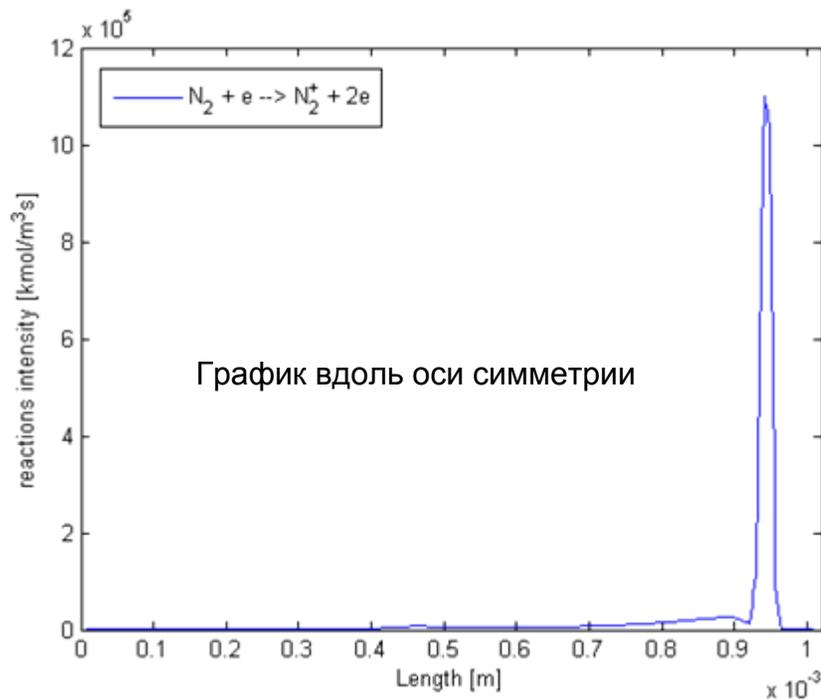
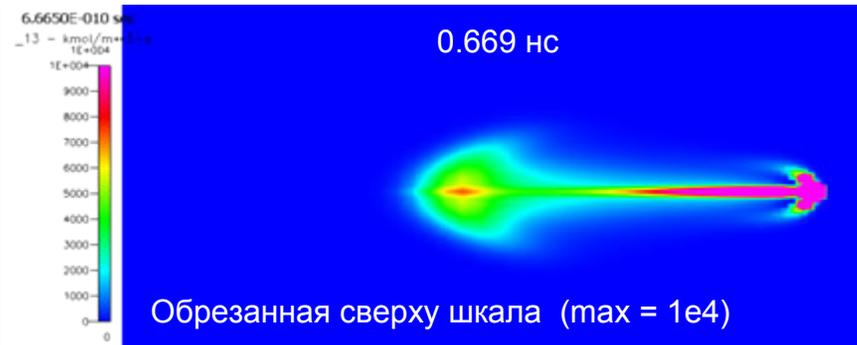
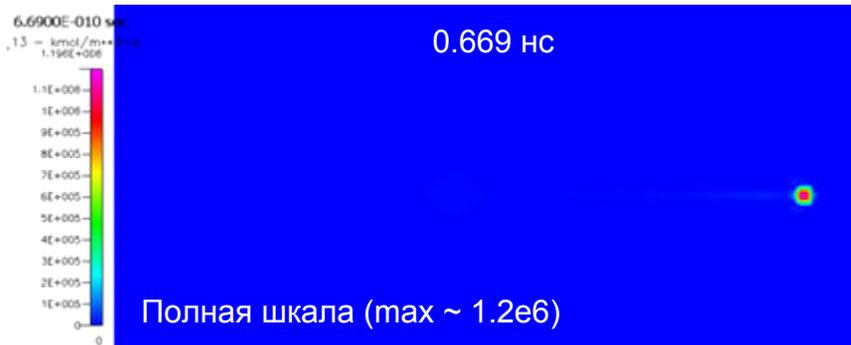
Серия контурных графиков в разные моменты времени для подробного анализа процесса лавинно-стримерного перехода.



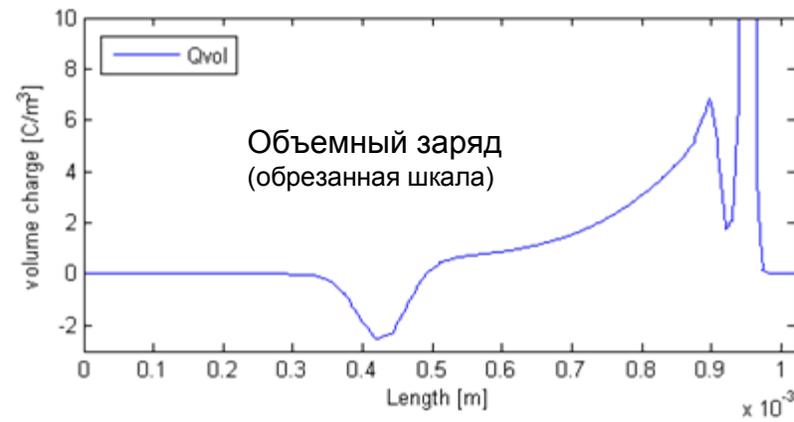
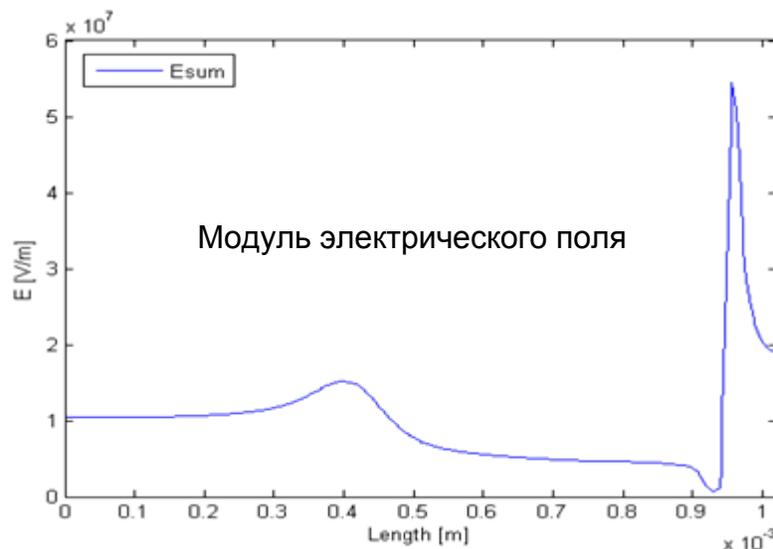
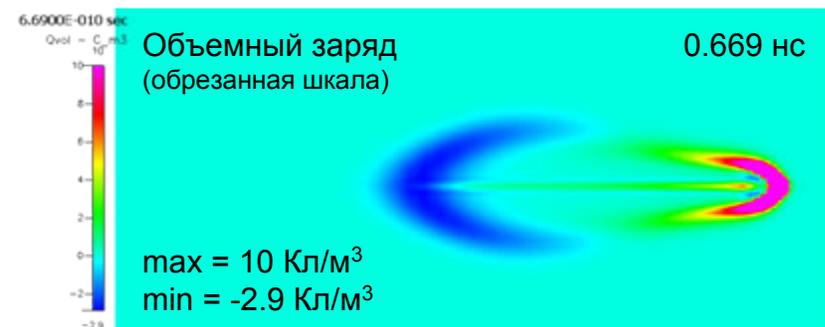
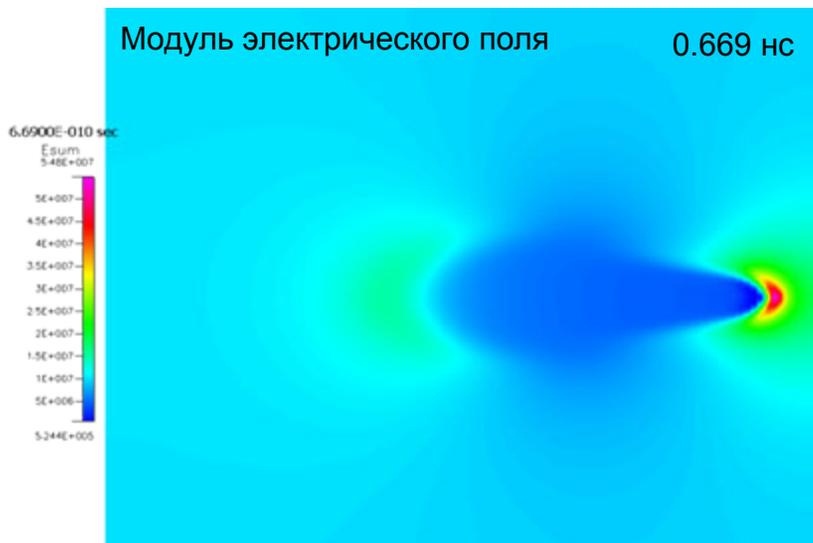
$U = 10$ кВ

Задача 2

Интенсивность ионизации N_2



Распределения заряда и электрического поля

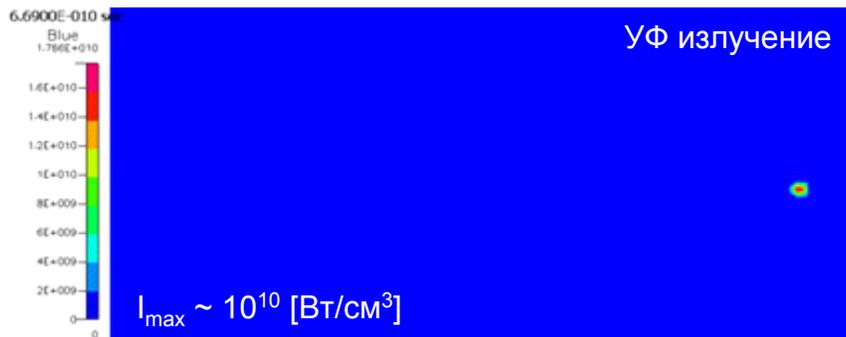
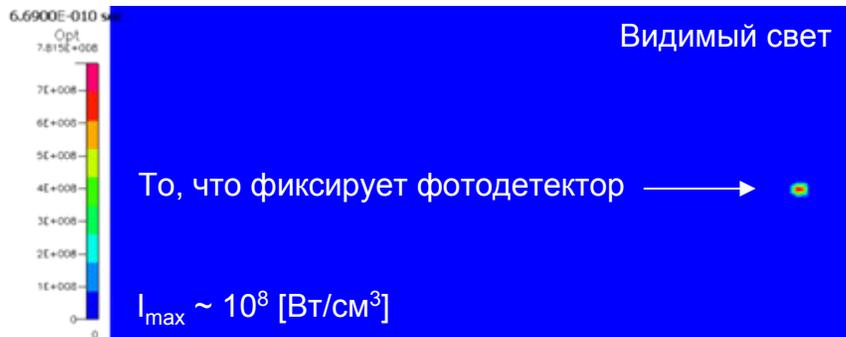
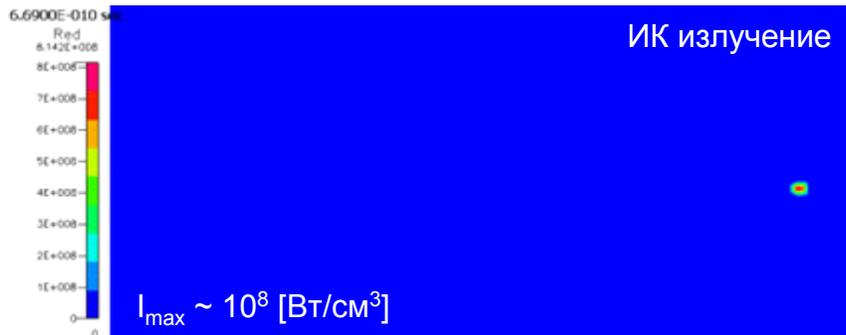


U = 10 кВ

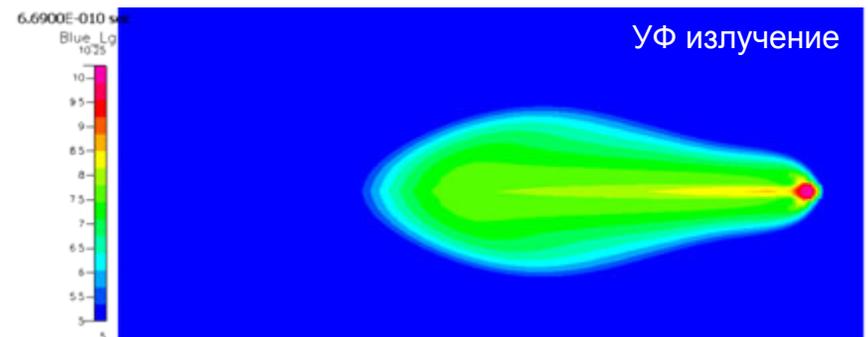
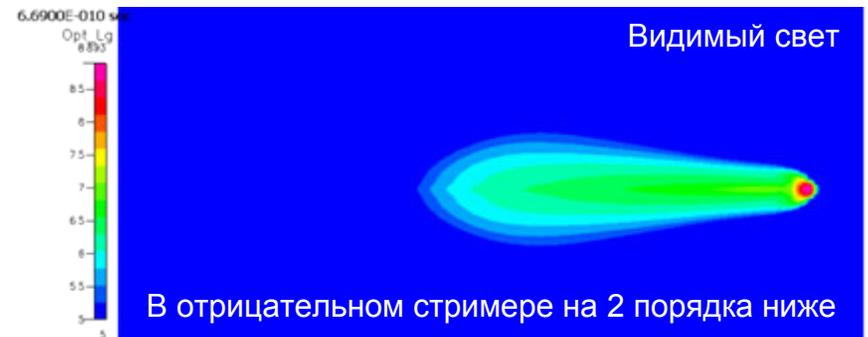
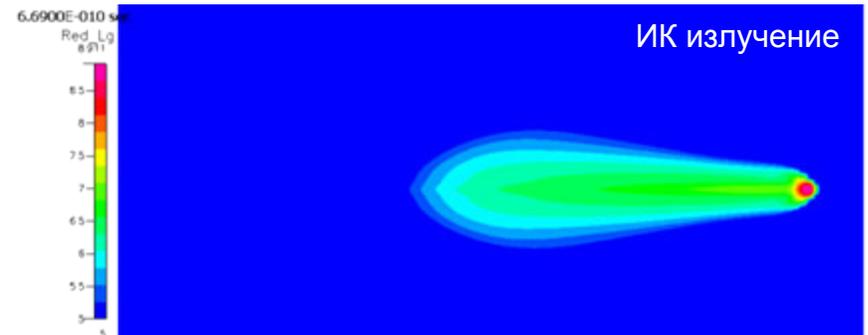
Задача 2

Интенсивность свечения

Линейный масштаб



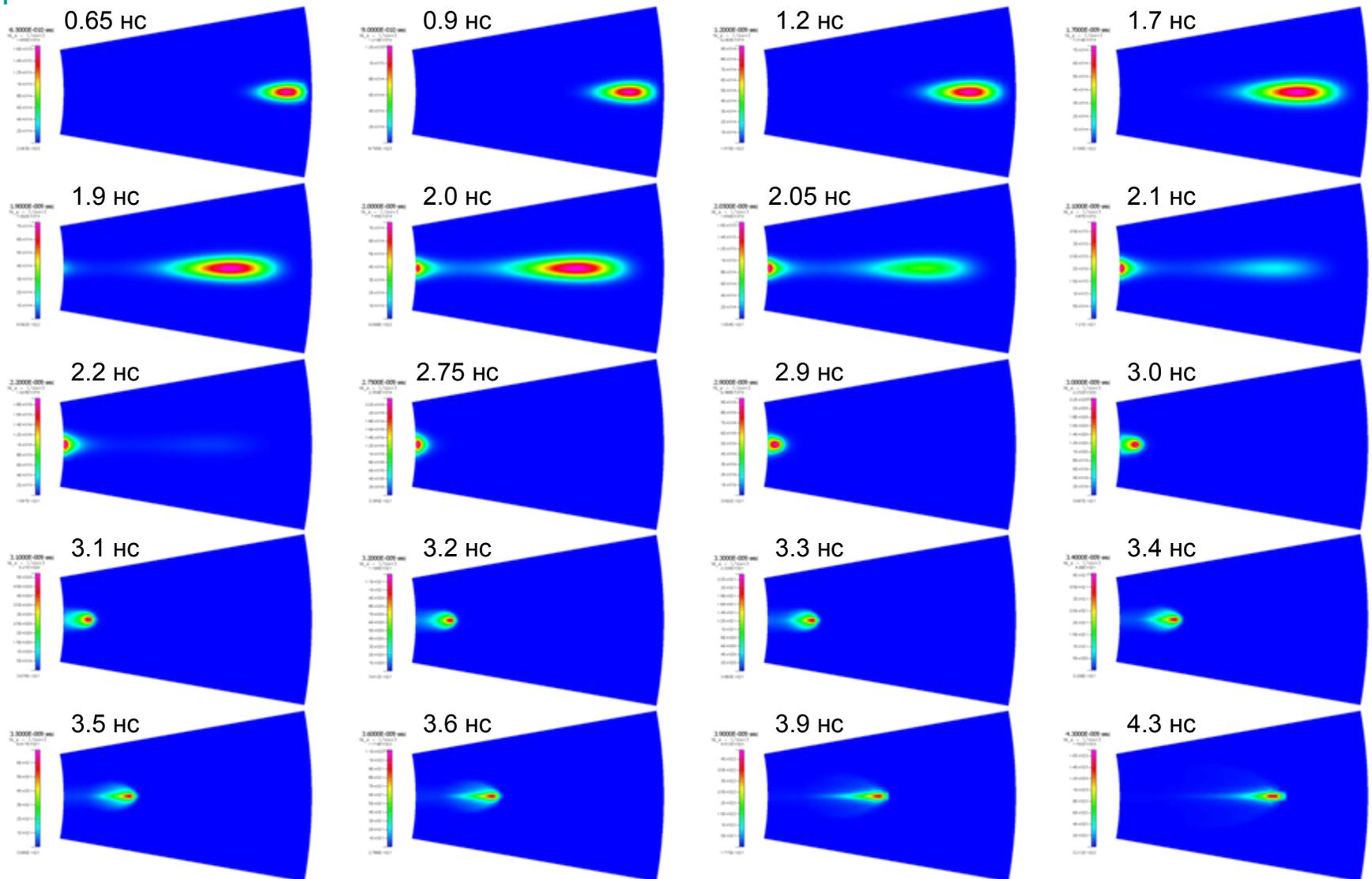
Логарифмический масштаб



U = 10 кВ

Задача 2

Концентрация электронов

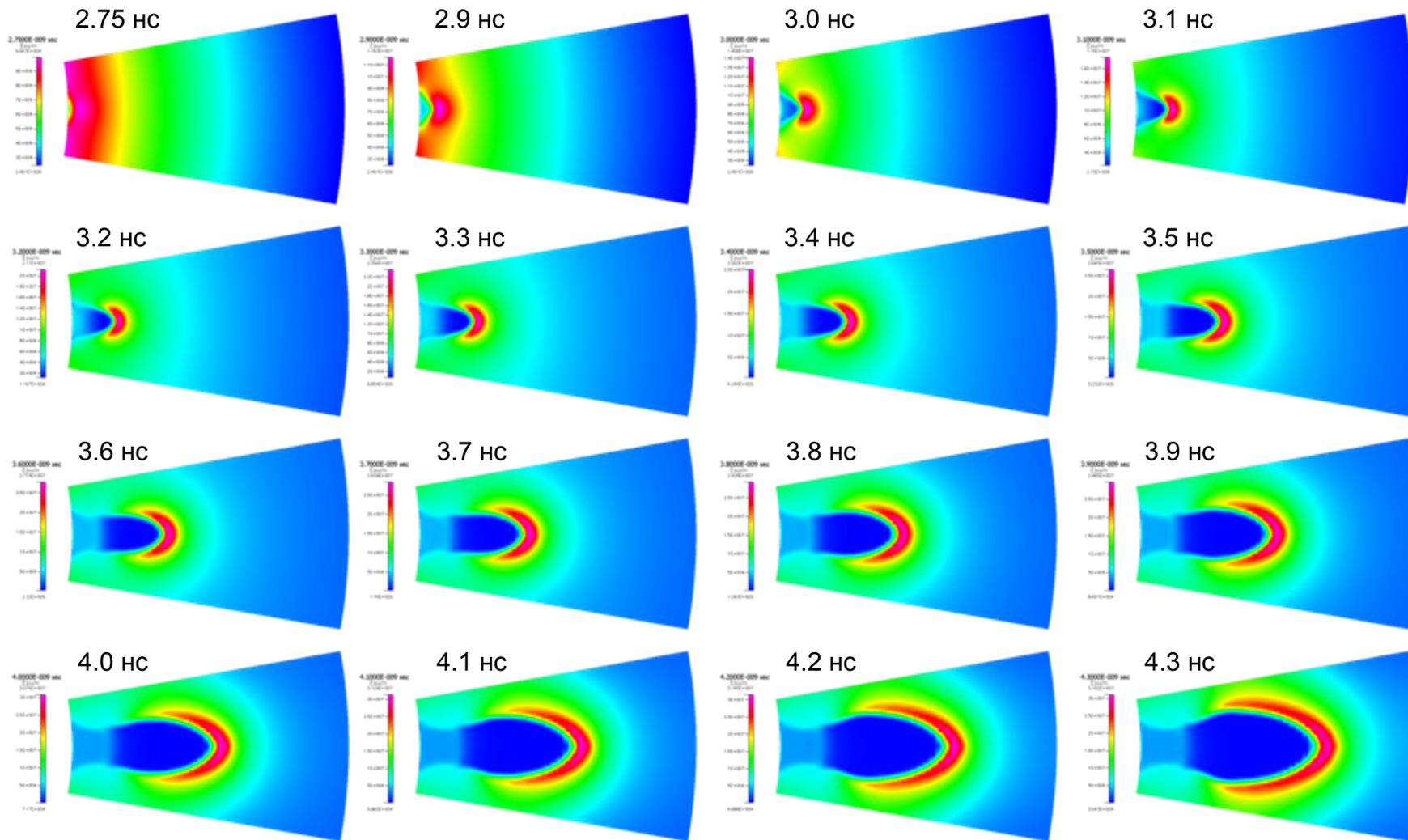


$U = 10$ кВ, $K \approx 2$

Задача 3

Электрическое поле

Проращение положительного стримера от анода к катоду.

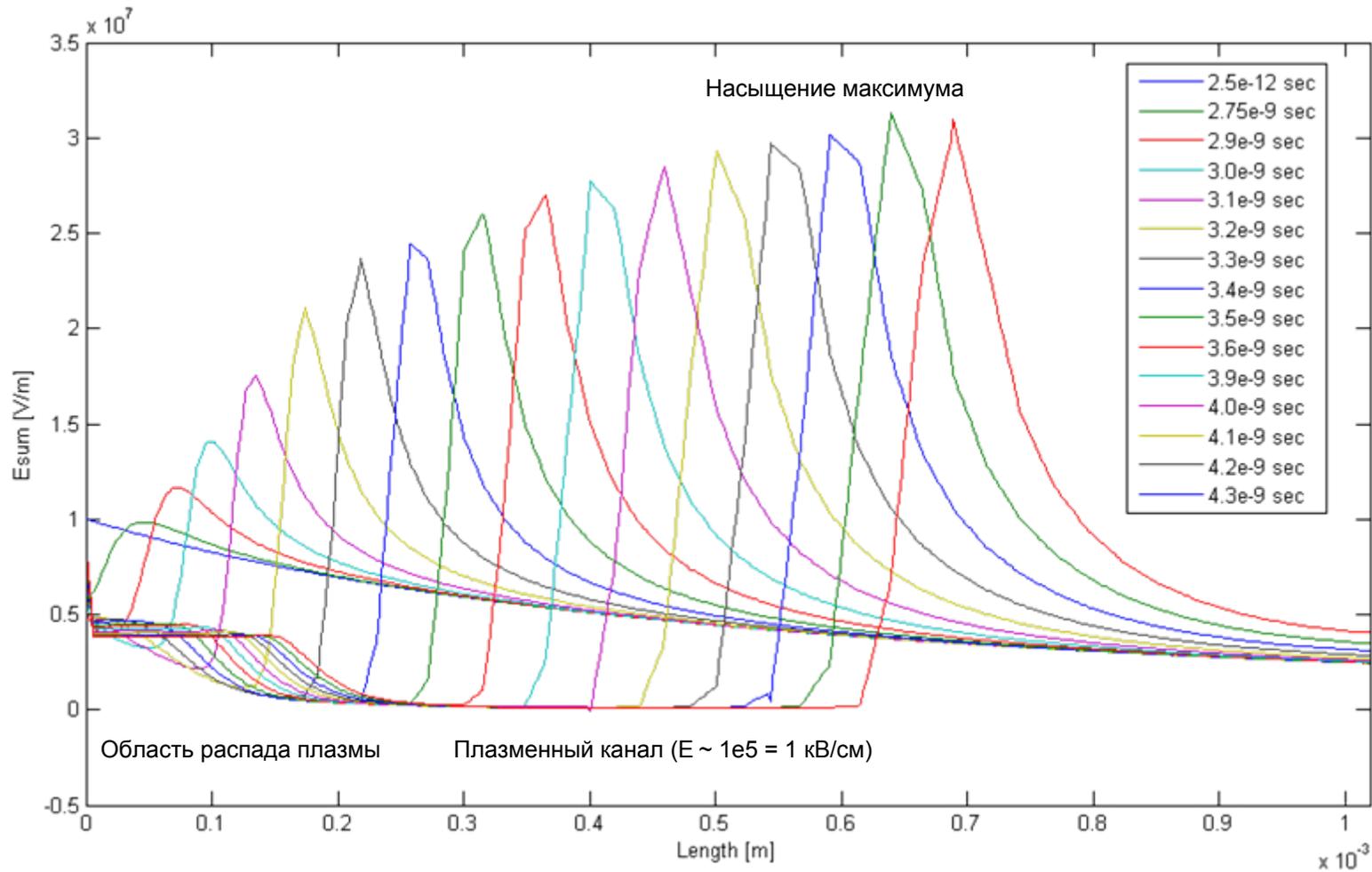


$U = 10$ кВ, $K \approx 2$

Задача 3

Электрическое поле

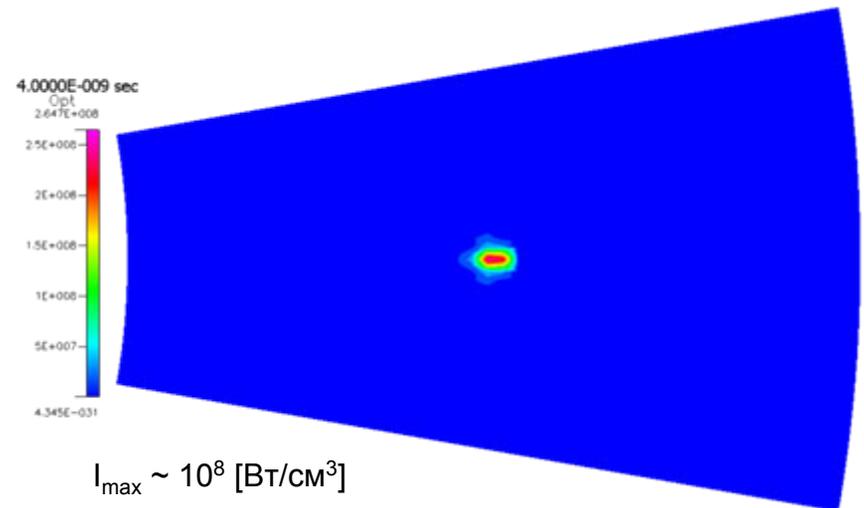
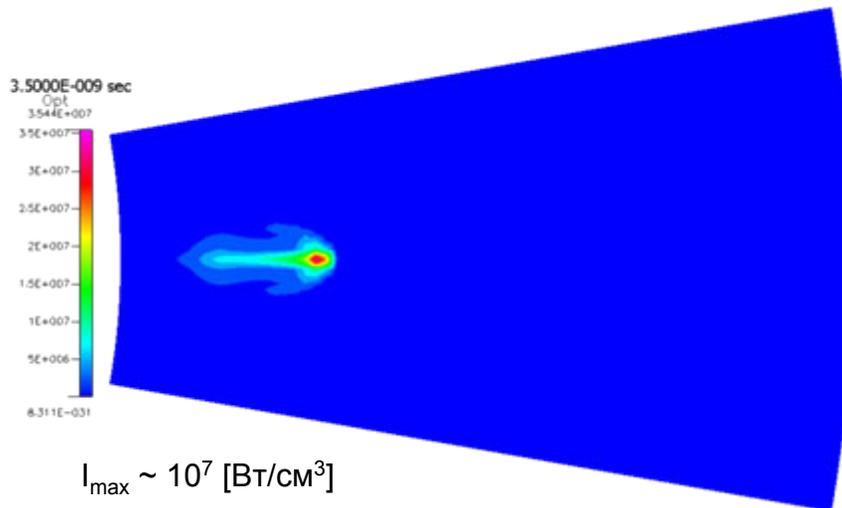
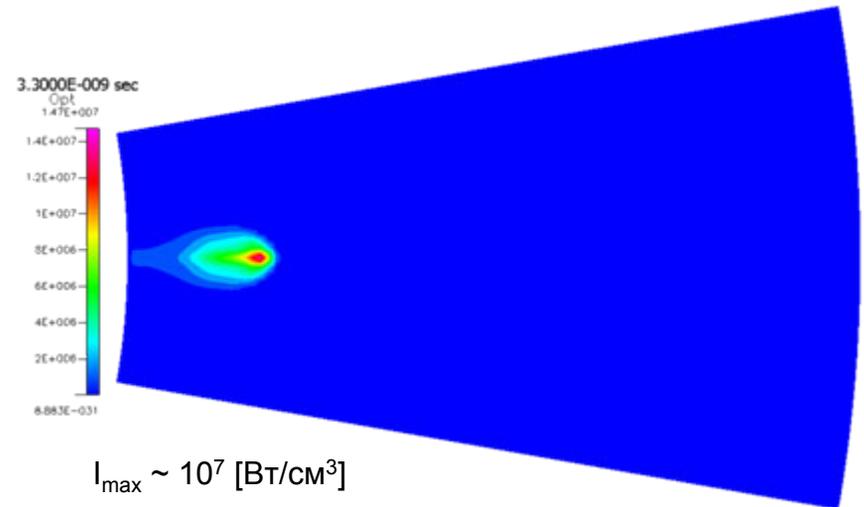
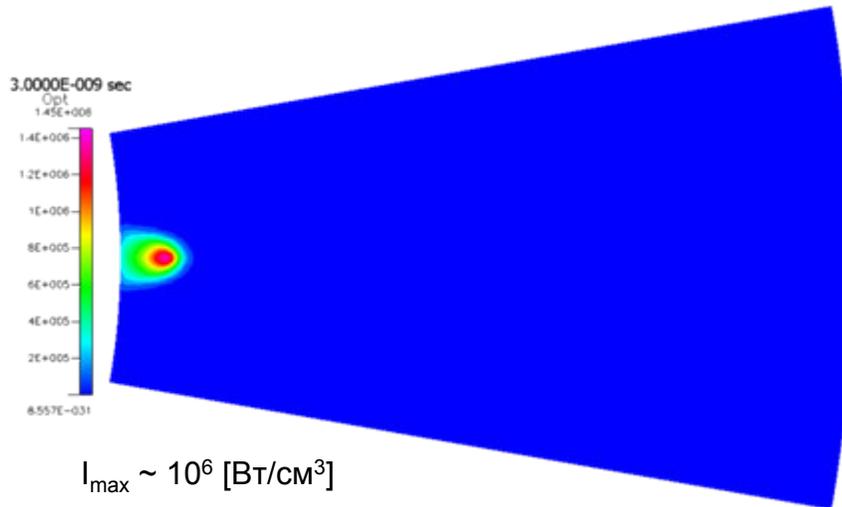
Проращение положительного стримера от анода к катоду.



$U = 10 \text{ кВ}, K \approx 2$

Задача 3

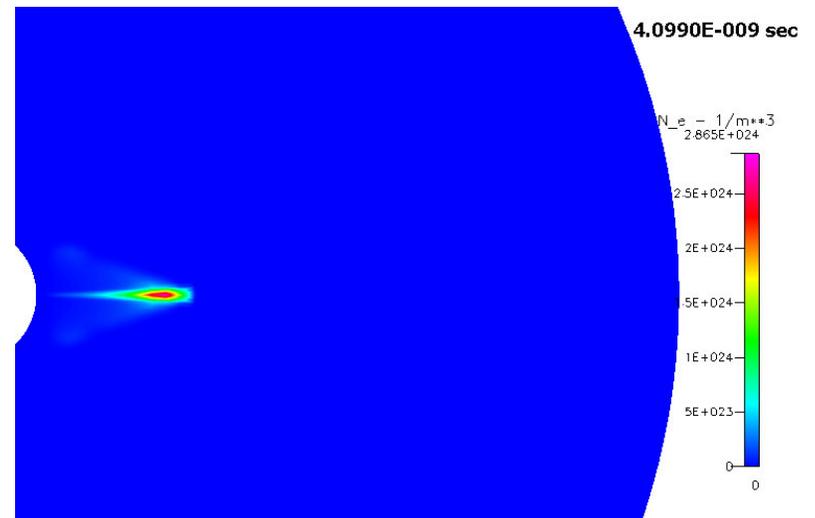
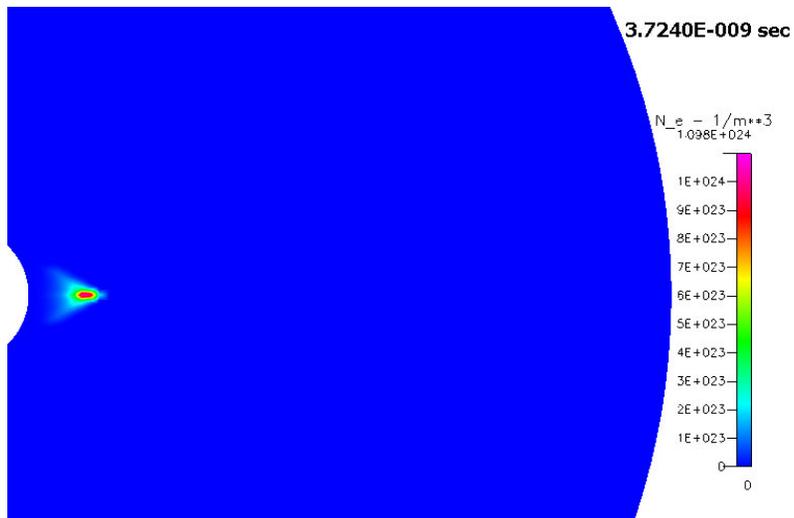
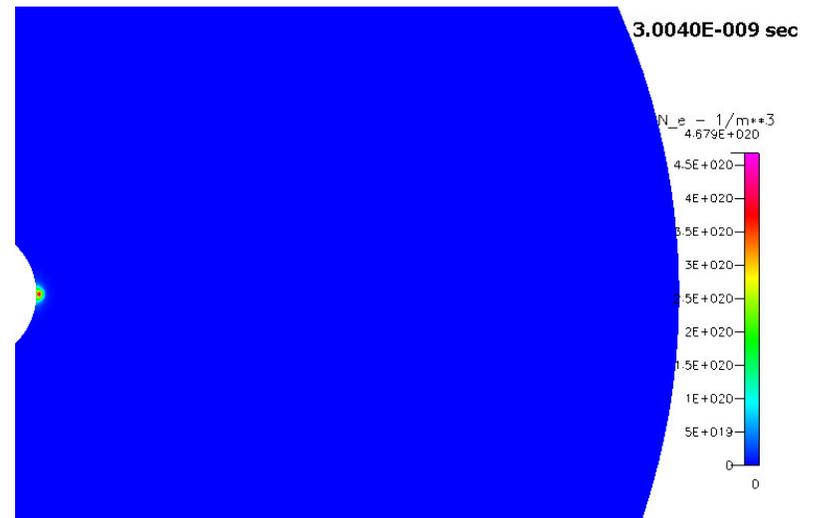
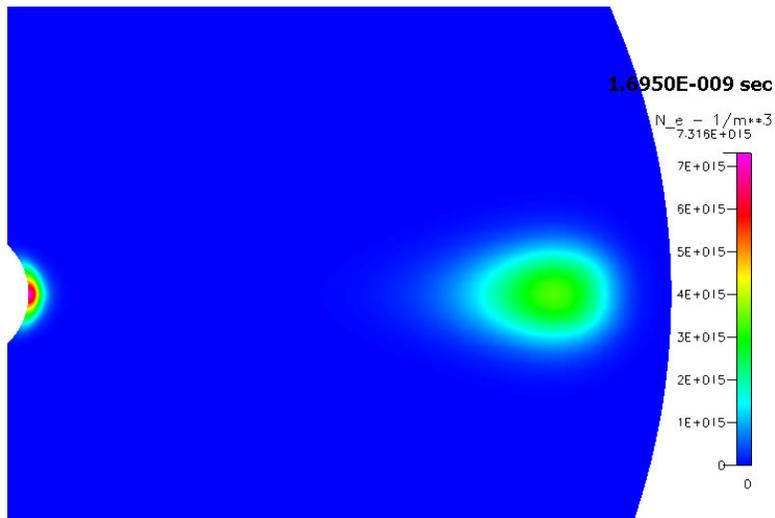
Интенсивность свечения (видимый свет)



$U = 10$ кВ, $K \approx 2$

Задача 3

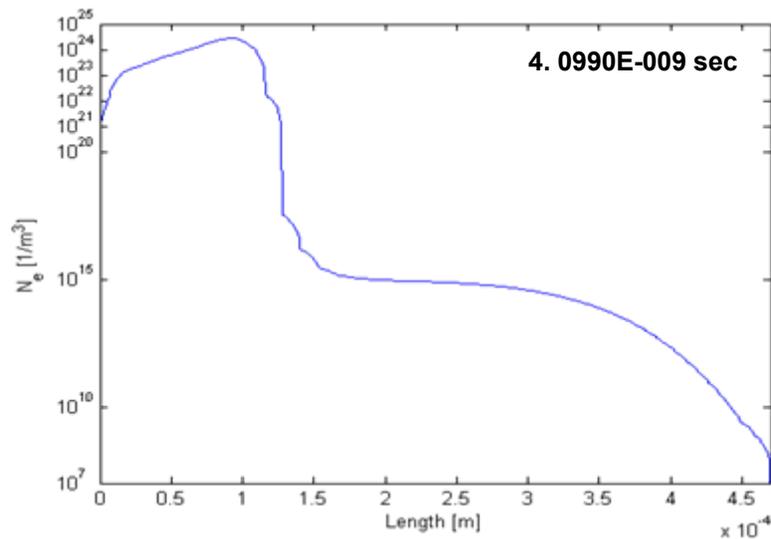
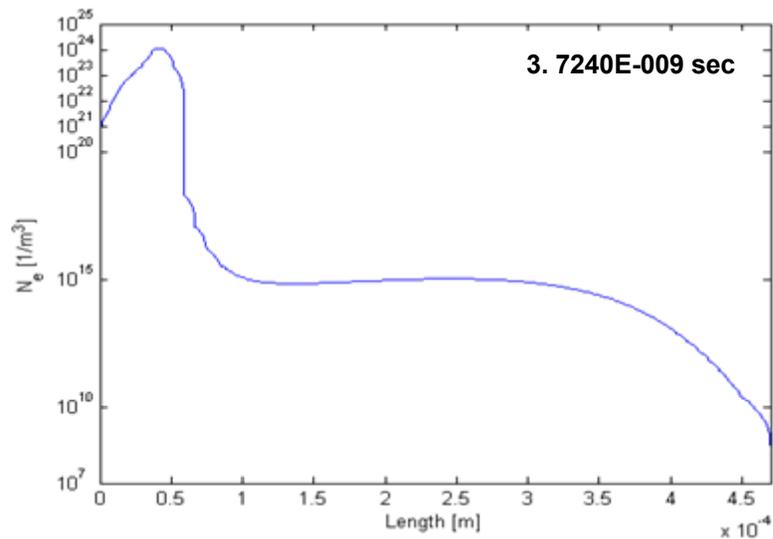
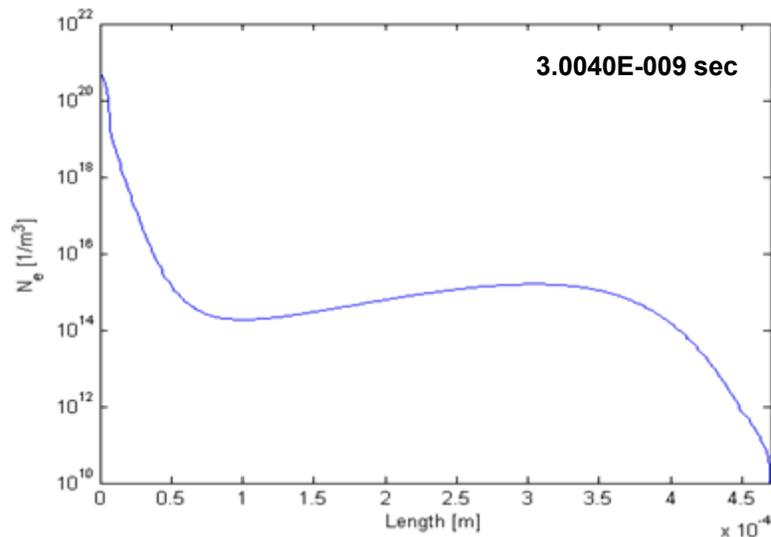
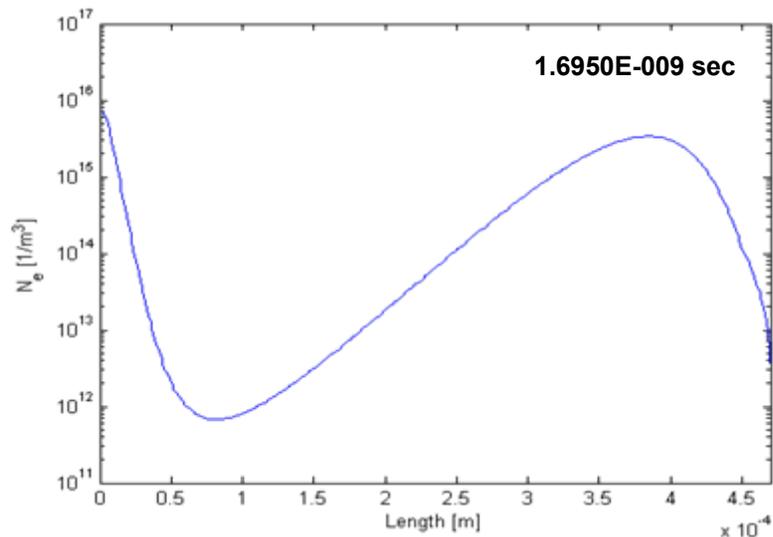
Концентрация электронов



$U = 2$ кВ, $K \approx 10$

Задача 4

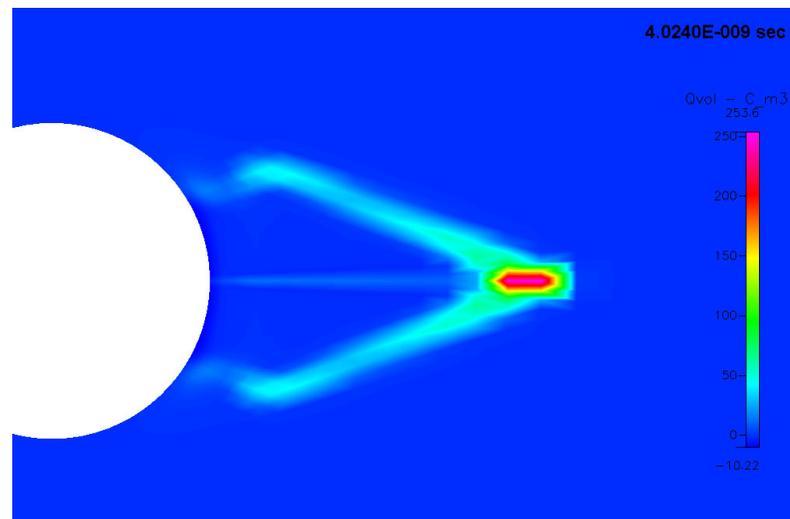
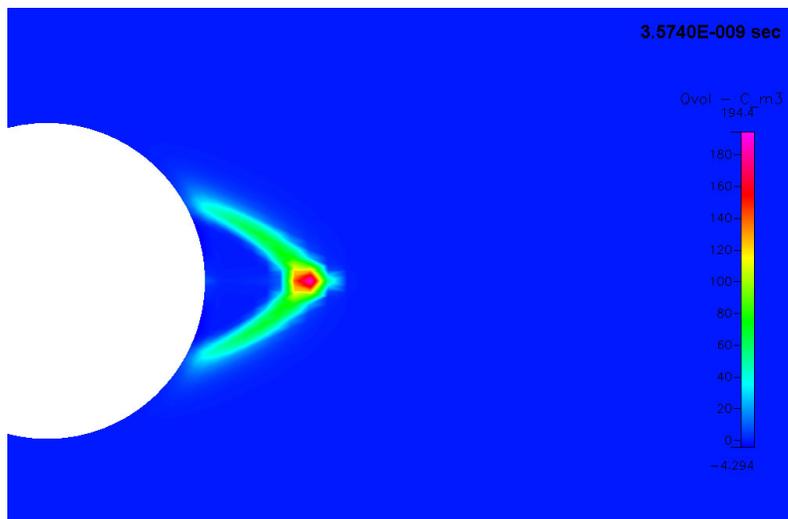
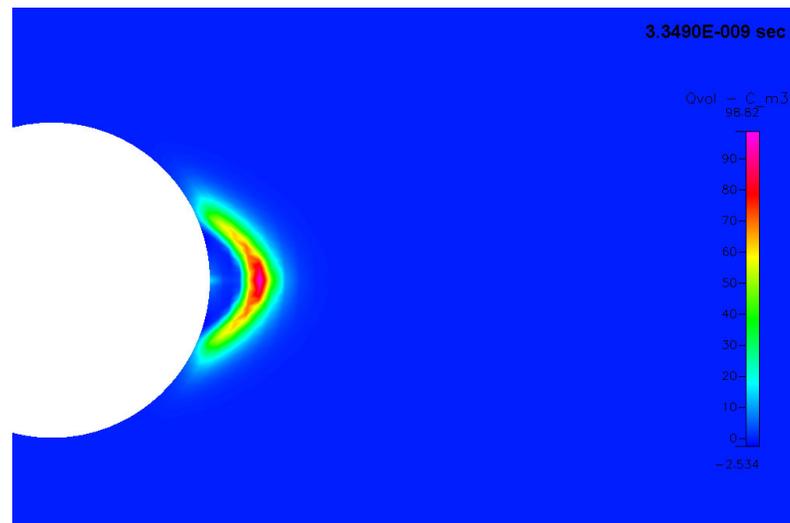
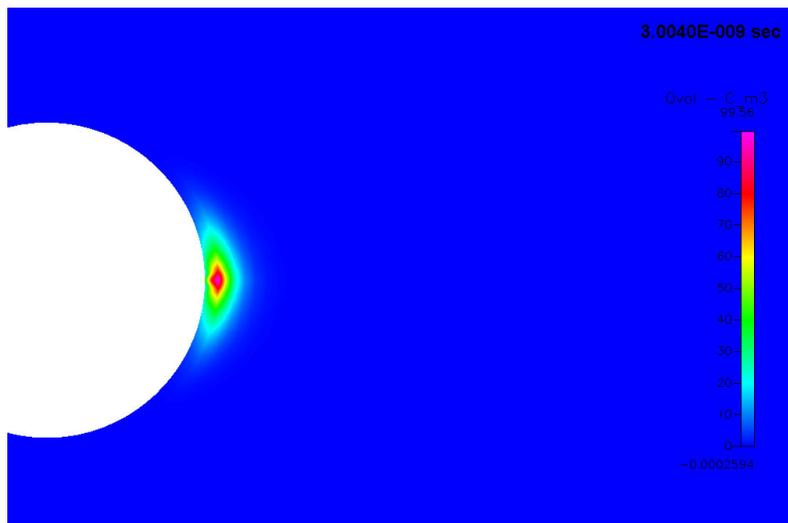
Концентрация электронов



$U = 2$ кВ, $K \approx 10$

Задача 4

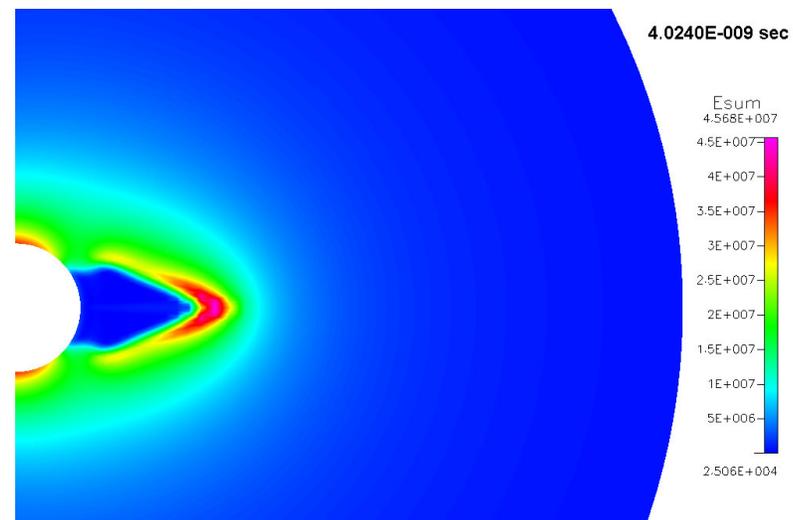
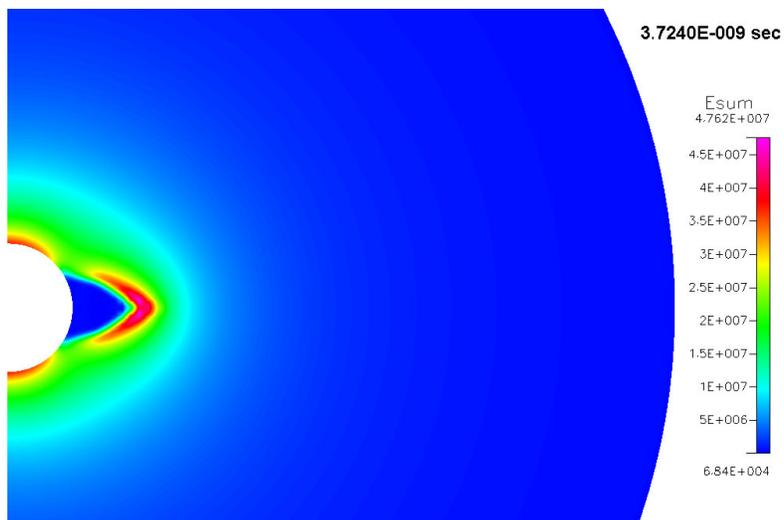
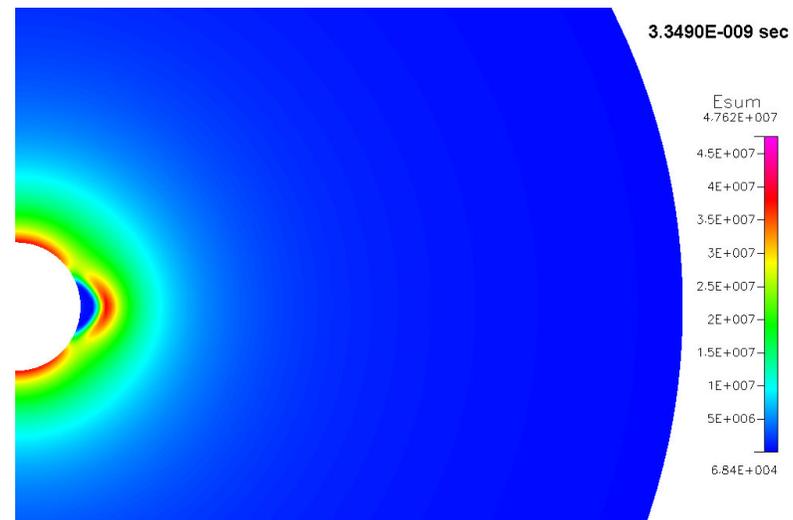
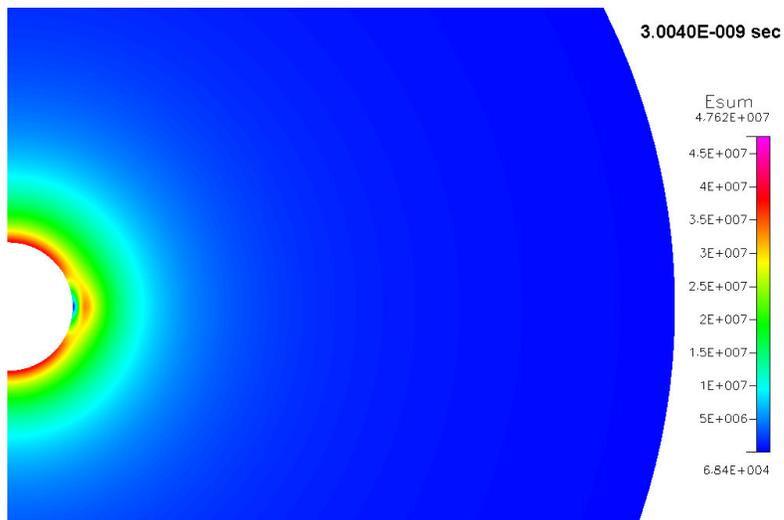
Объемный заряд



$U = 2 \text{ кВ}, K \approx 10$

Задача 4

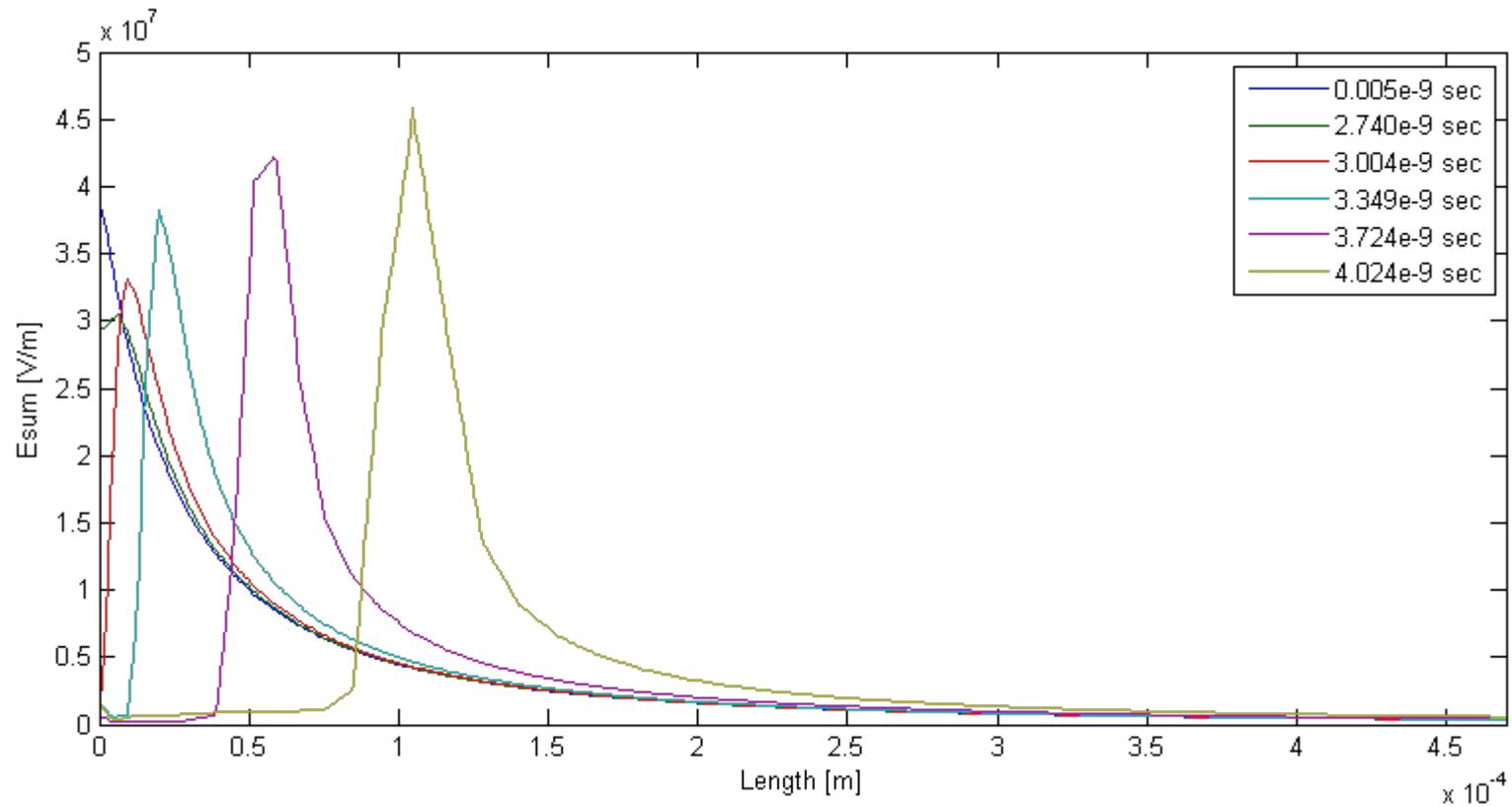
Электрическое поле



$U = 2 \text{ кВ}, K \approx 10$

Задача 4

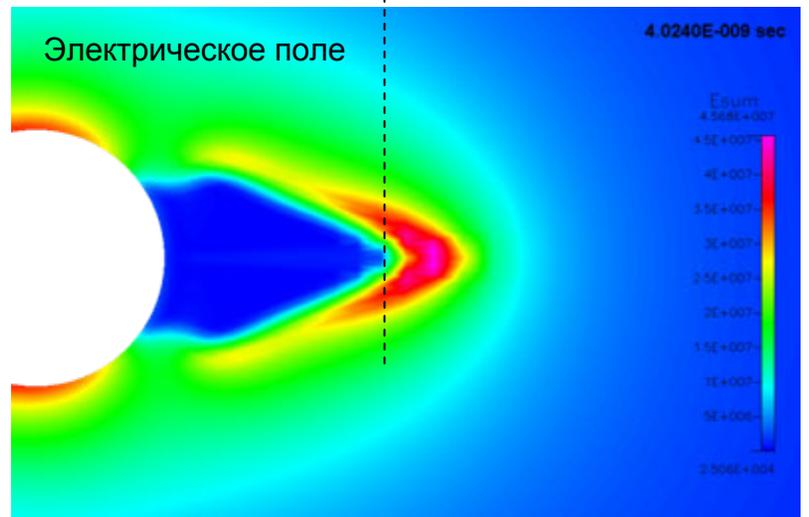
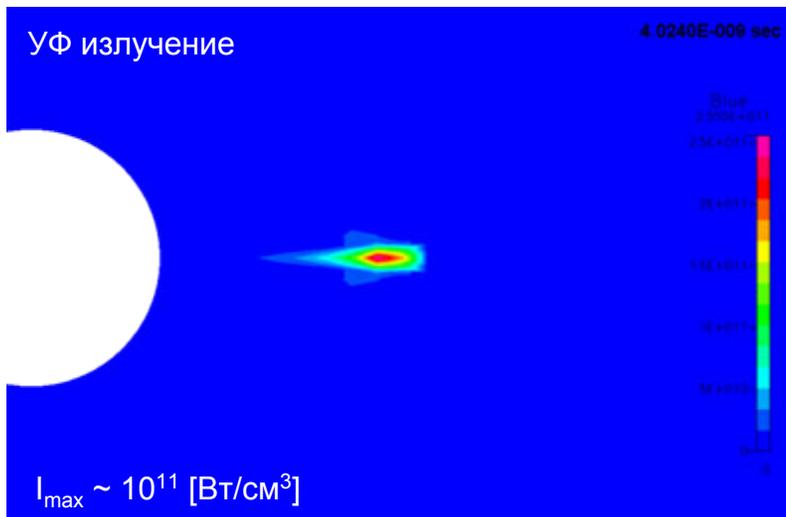
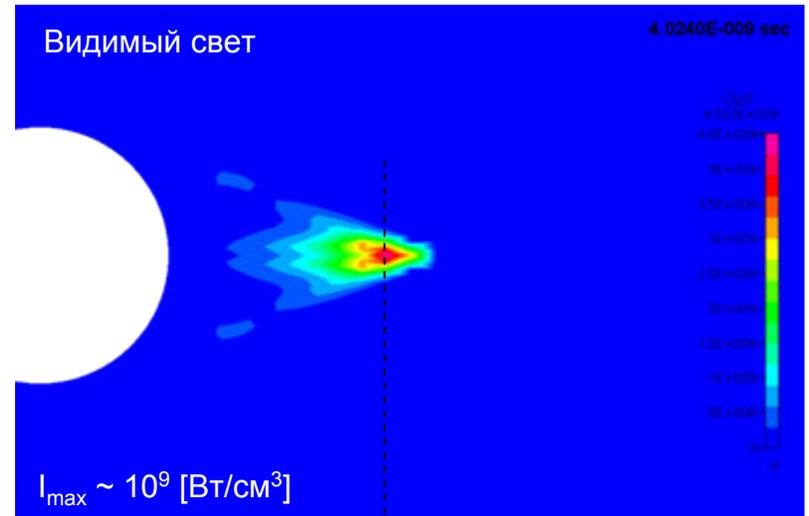
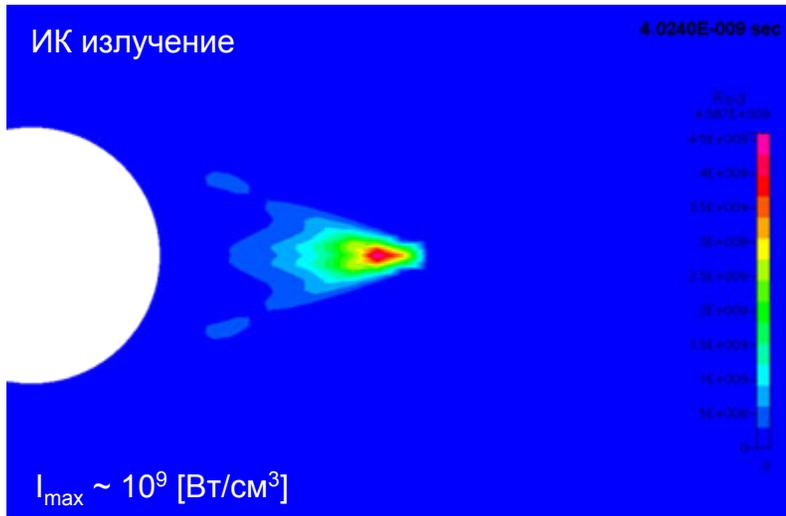
Электрическое поле



$U = 2$ кВ, $K \approx 10$

Задача 4

Интенсивность свечения



$U = 2$ кВ, $K \approx 10$

Задача 4

Выводы:

- Подробно рассмотрен процесс лавинно-стримерного перехода в рассчитанных моделях.
- Все стримеры, полученные в результате моделирования, являются либо положительными (катодонаправленными), либо присутствуют оба стримера, причем у отрицательного (анодонаправленного) стримера интенсивность реакций ионизации на два порядка меньше.
- У положительного стримера головка сужается в процессе прорастания, а у отрицательного – расширяется.
- У положительного стримера есть четко выраженный плазменный канал, поле в котором сильно понижено.
- Скорость прорастания положительного стримера, образовавшегося в межэлектродном промежутке меньше скорости прорастания отраженного стримера, прорастающего от анода навстречу лавине. Из-за того, что в последнем случае концентрация свободных электронов в межэлектродном промежутке в направлении прорастания стримера значительно выше.