

Численное моделирование сильноточных разрядов и главной стадии разряда молнии

А.Н. Бочаров¹, Е.А. Мареев², Н.А. Попов¹

¹Объединенный институт высоких температур РАН

²Институт прикладной физики РАН

Цели работы

Изучение процессов в искровых импульсных разрядах

Изучение процессов в сильноточных импульсных разрядах и дугах

Изучение процессов, характеризующих главную стадию разряда молнии

Задачи

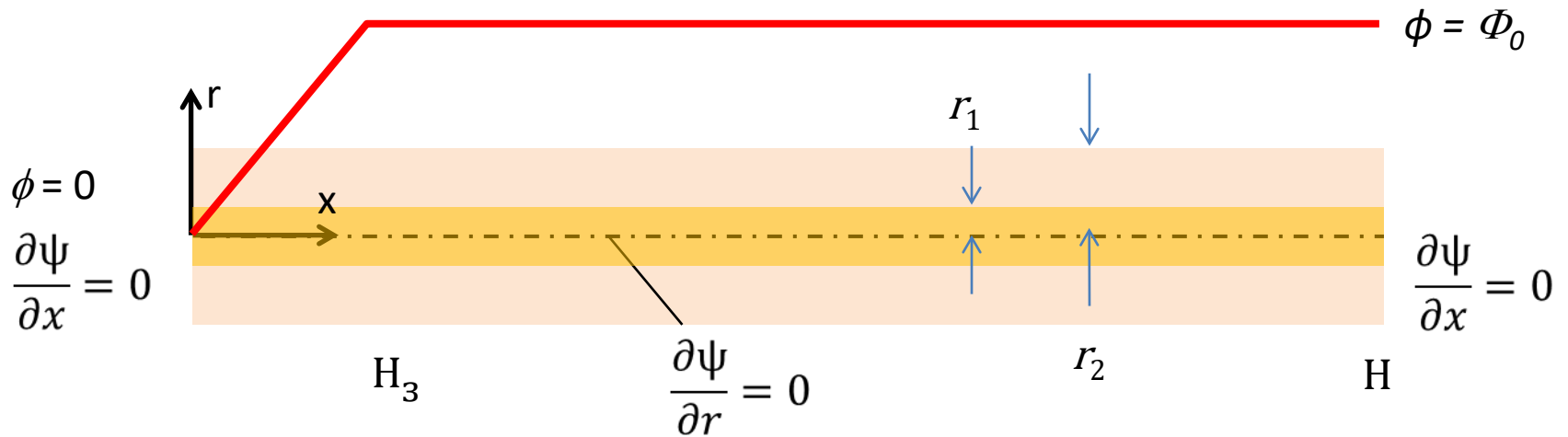
Разработка численной модели для анализа характеристик сильноточных разрядов в газах

Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных характеристик сильноточного разряда в воздухе

Оценка характеристик разрядного канала в процессе главной стадии разряда молнии

Оценка электромагнитного излучения разряда молнии

К постановке задачи о расчете главной стадии



Начальное состояние

$$\frac{T(r) - T_0}{T_1 - T_0} = 1 - \left(\frac{r}{r_1}\right)^n$$

$$T_0 = 300\text{K}, T_1 = 3000\text{-}6000\text{K}$$

$$P_0 = 10^5\text{ Па}$$

Математическая модель сильноточных и молниевых разрядов

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V}) = 0$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) - \nabla \boldsymbol{\tau} = -\nabla P$$

$$\frac{\partial \rho e_0}{\partial t} + \nabla((\rho e_0 + P) \mathbf{V}) + \nabla(\mathbf{V} \boldsymbol{\tau}) + \nabla \mathbf{q} = Q_E - Q_r$$

$$e^0 = e^0_{equ}(\rho, T), P = P_{equ}(\rho, T)$$

$$\tau_{ij} = -\frac{2}{3} \eta \delta_{ij} \nabla \mathbf{V} + \eta \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right), \mathbf{q} = -\lambda \nabla T$$

$$\frac{1}{c} \frac{\partial U}{\partial t} + \nabla \left(-\frac{1}{3\kappa} \nabla U \right) = \frac{\kappa}{c} (4\sigma_{SB} T^4 - cU)$$

$$U = \frac{1}{c} \int I d\Omega, Q_r = cS_r$$

$$Q_E = \mathbf{J} \mathbf{E}, \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$$

$$\frac{d\Phi}{dx} + L_0 \frac{dl}{dt} + R_0 I = 0$$

$$\frac{dl}{dx} + C_0 \frac{d\Phi}{dt} = 0$$

$$R_0^{-1}(x) = \int_0^{r_1} 2\pi r \sigma(x, r) dr$$

$$C_0 = \frac{2\pi \epsilon_0}{\ln\left(\frac{H}{r_2}\right)},$$

$$L_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{H}{r_1}\right)$$

Вычислительные аспекты

Газодинамическая часть системы решается стандартно: одношаговый метод Эйлера с аппроксимацией 1го порядка конвективных (AUSM-подобные модели) и диссипативных потоков (центральные разности).

Задача радиационного переноса – двумерная эллиптическая задача – решается набором методов, включая многосеточные процедуры и сильно неявные процедуры LU-разложения.

Интегрирование уравнений длинной линии выполняется на интервале времени, равном «газодинамическому» временному шагу. При этом внутренний, «электродинамический» шаг составляет величину $\sim h/c$ (h – размер сеточной ячейки, c – скорость света). Каждый внутренний шаг выполняется по классической схеме Рунге – Кутты 4-го порядка аппроксимации по времени.

Для оценки переносных свойств высокотемпературного воздуха используются литературные данные по сечениям столкновений.

Для оценки термодинамических свойств используются аппроксимации [1].

В основе оценки радиационных свойств плазмы лежат данные о коэффициенте поглощения, также полученные из литературы [2].

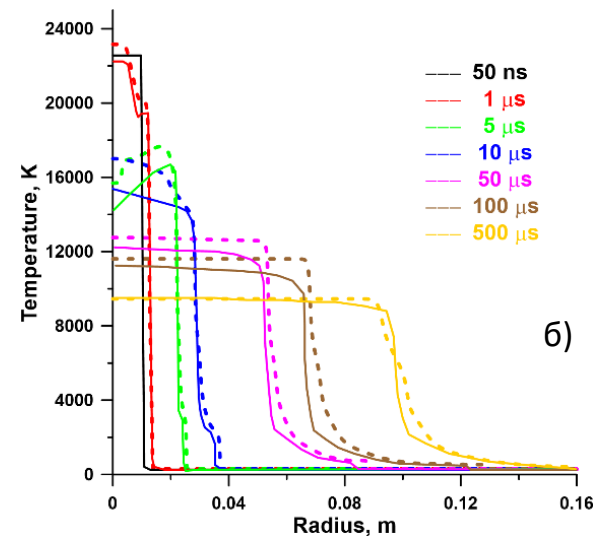
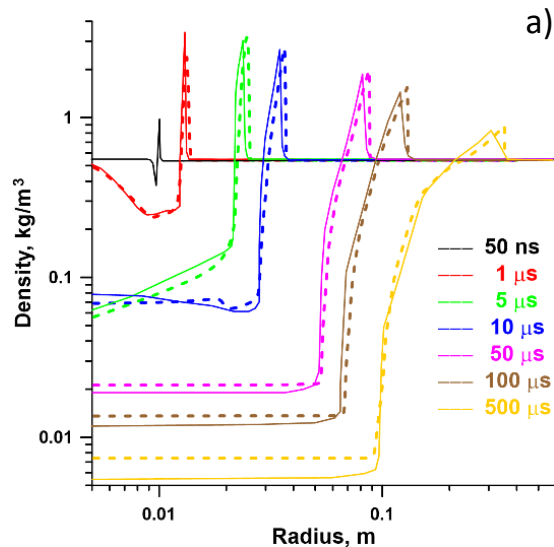
1. *D'Angola A., Colonna G., Gorse C., Capitelli M.* Thermodynamic and transport properties in equilibrium air plasmas in a wide pressure and temperature range. Eur. Phys. J. D 2008. V. 46. P. 129. DOI: 10.1140/epjd/ e2007 -00305-4.

2. *Авилова И.В., Биберман Л.М., Воробьев В.С. и др.* Оптические свойства горячего воздуха. М.: Наука. 1970. 320с.

Верификация модели

Задача 1. Релаксация горячего канала, моделирующего разряд молнии на высоте 8 км: плотность – 0.541 кг/м³, температура – 23162 К, давление – 0.47 атм, радиус канала – 1 см

3. Ripoll J-F, Zinn J, Jeffery C A and Colestock P L 2014 On the dynamics of hot air plasmas related to lightning discharges: 1. Gas dynamics *J. Geophys. Res. Atmos.* **119** 9196–9217

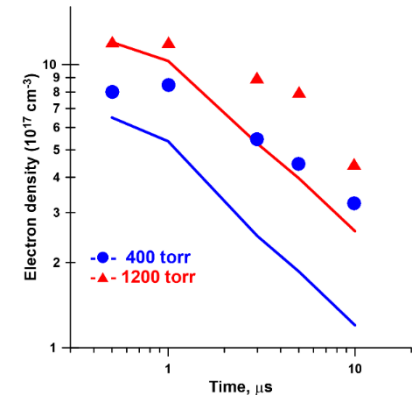
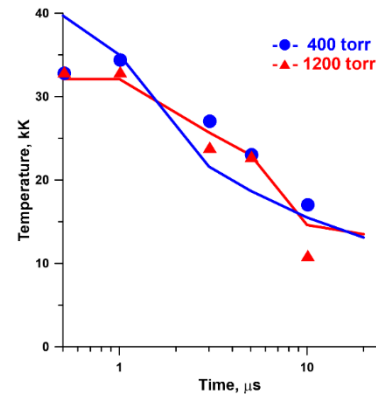
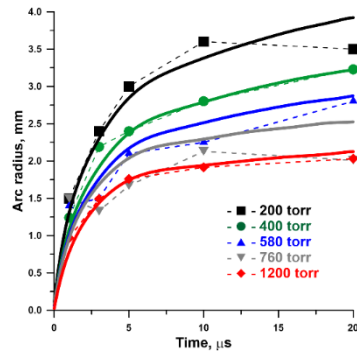
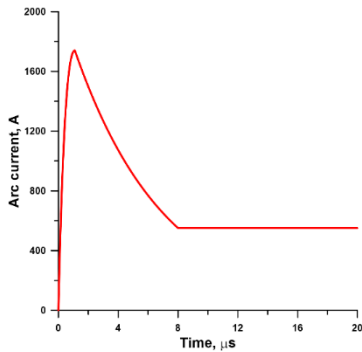


Распределения плотности (а) и температуры (б) в различные моменты времени. Сплошные – работа [3], пунктир – данная работа.

Верификация модели

Задача 2. Разряд электрод – плоскость в длинном промежутке

4. Robledo-Martinez A, Sobral H and Ruiz-Meza A 2008 Time-resolved diagnostic of an impulse discharge in variable pressure air *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41** 175207 (9pp)



$$I = \begin{cases} I_0 \cdot z \cdot \exp(1 - z), & z \leq 1 \\ I_0 \cdot \exp\left(\frac{1 - z}{z_1}\right), & z \leq z_2 \\ I_0 \cdot \exp\left(\frac{1 - z_2}{z_1}\right), & z > z_2 \end{cases}$$

Изменение радиуса канала во времени. Символы – эксперимент [4], сплошные кривые – данная работа

Температура (слева) и электронная концентрация (справа) на оси разряда. Символы – эксперимент [4], сплошные кривые – данная работа

$$\begin{aligned} z &= t/t_1, z_1 = t_2/t_1, \\ z_2 &= t_3/t_1, t_1 = 1.1 \mu\text{s}, \\ t_2 &= 6 \mu\text{s}, t_3 = 8 \mu\text{s}, \\ I_0 &= 1740 \text{ A} \end{aligned}$$

Верификация модели

Задача 3. Моделирование сильнотоковых разрядов [5,6]

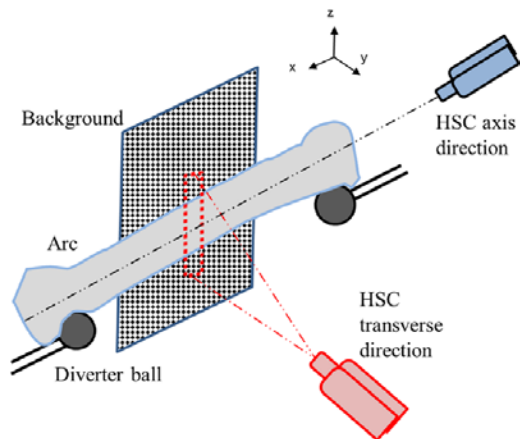
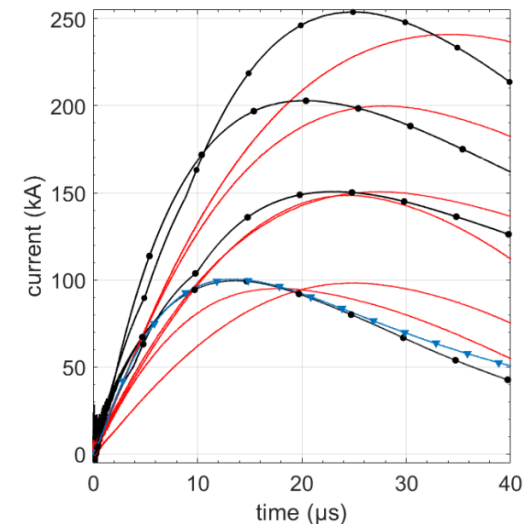
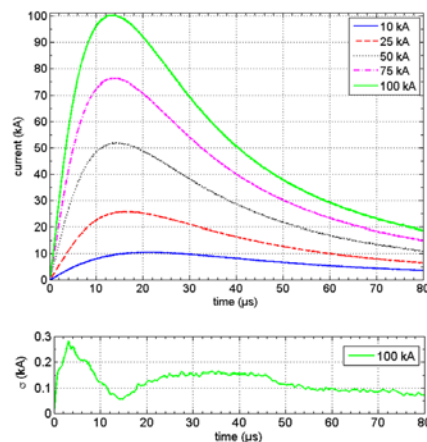


Figure 1. Diagnostics setup with two high speed cameras (HSC) and a patterned background



$$I(t) = I_0(t/\tau)^n \exp((1 - t/\tau) \cdot n)$$

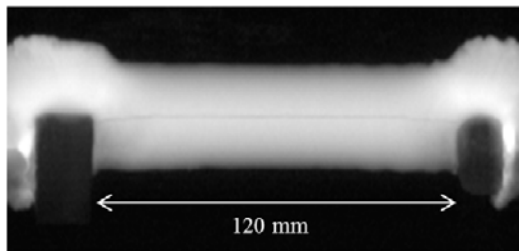
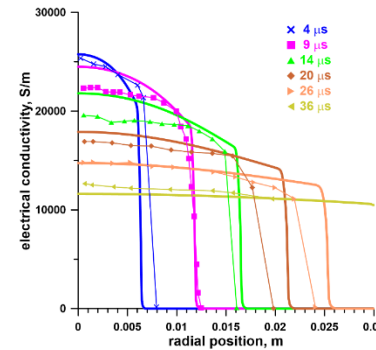
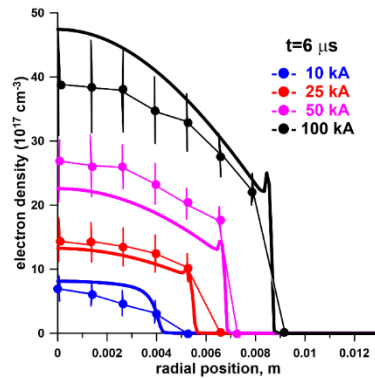
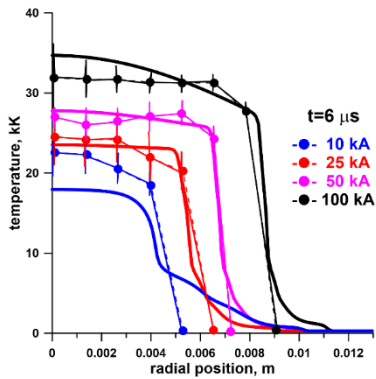


Figure 2. Picture of the 100 kA peak arc at 14 μ s after ignition (image resolution: 0.67 mm/pixel; exposure time: 300 ns).

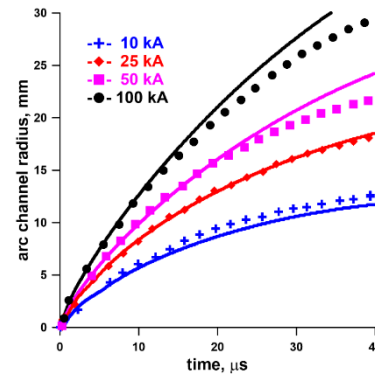
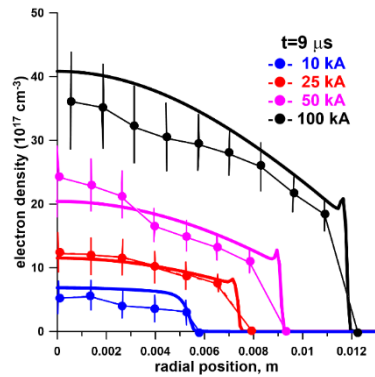
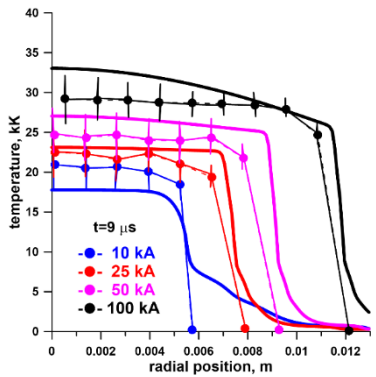
5. Sousa Martins R, Zaepffel C, Chemartin L, Lalande Ph and Soufiani A 2016 Characterization of a high current pulsed arc using optical emission spectroscopy *J. Phys. D: Appl. Phys.* **49** 415205

6. Sousa Martins R, Zaepffel C, Chemartin L, Lalande Ph and Lago F 2019 Characterization of high-current pulsed arcs ranging from 100–250 kA peak *J. Phys. D: Appl. Phys.* **52** 185203

Задача 3. Сильноточный разряд 10 – 100 кА [5]



Профили электропроводности для $I = 100 \text{ кА} - 13 \mu\text{s}$. Символы – [5], сплошные – данная работа.



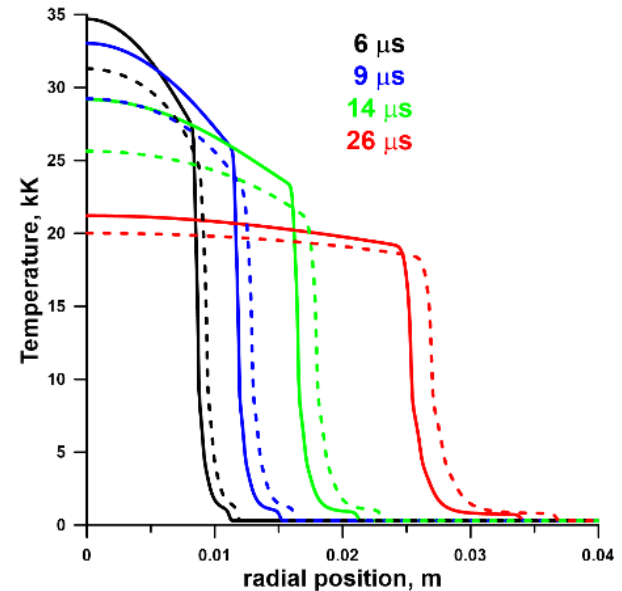
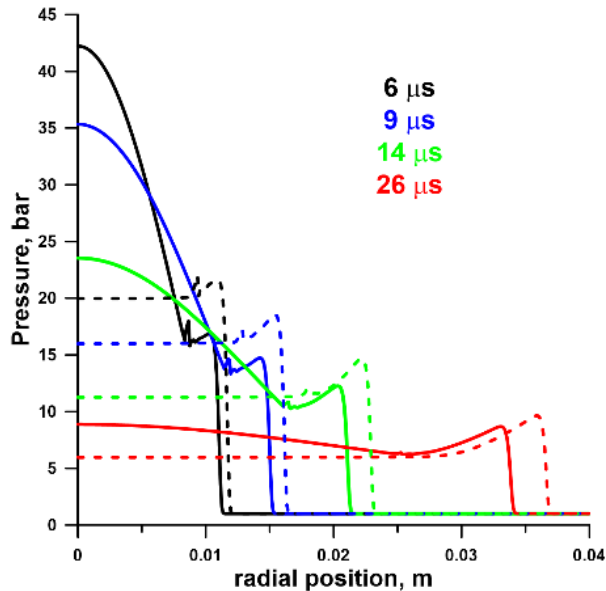
Радиус токового канала во времени. Символы – [5], сплошные – данная работа.

Температура (слева) и электронная концентрация (справа) для токов $I = 10-100 \text{ кА}$. Символы – [5], сплошные – данная работа.

Задача 3. Сильноточный разряд 10 – 100 кА [5] (пинч-эффект)

Модификация вычислительной модели

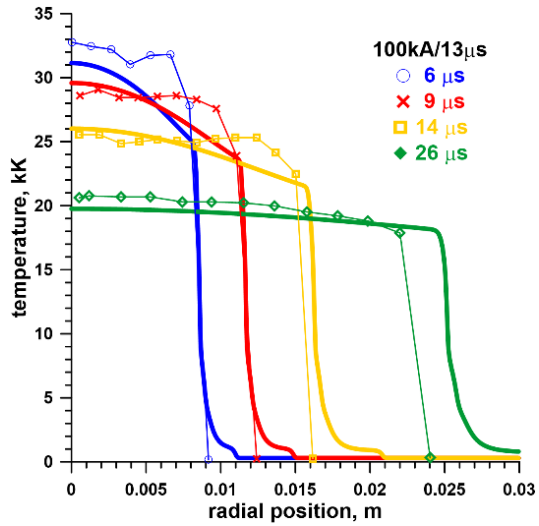
$$\frac{\partial B_\theta}{\partial t} - \frac{\partial E_z}{\partial r} = 0, \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial(rB_\theta)}{\partial r} = \mu_0 J_z, J_z = \sigma \cdot (E_z + V \cdot B_\theta)$$



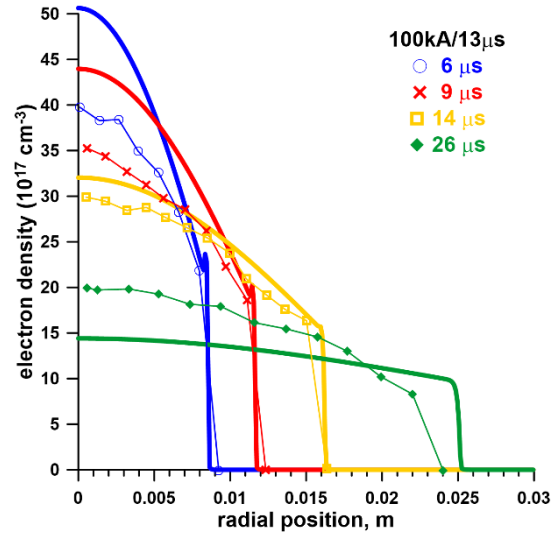
Давление (слева), температура (справа), для разряда 100 кА/13 μs .

Сплошные – с учетом пинч-эффекта, пунктир – без учета пинч-эффекта.

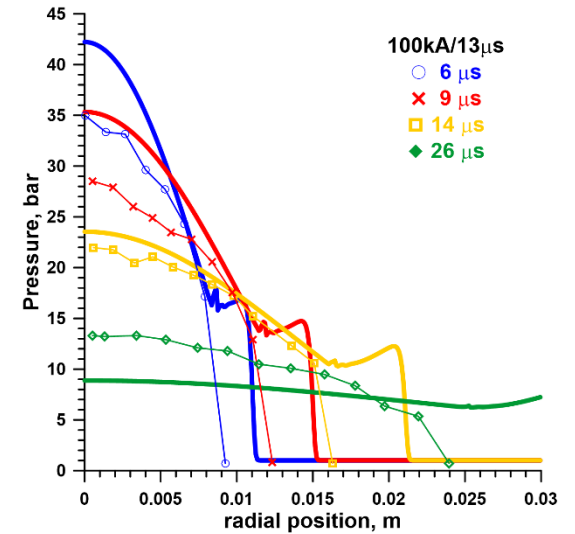
Задача 3. Сильноточный разряд 100 кА/13 мкс [6]



температура

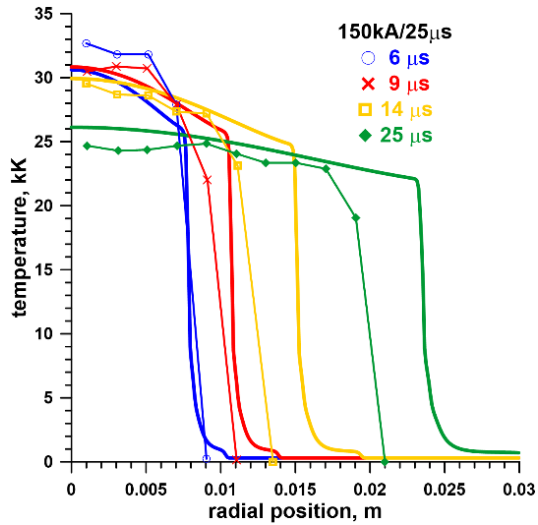


концентрация электронов

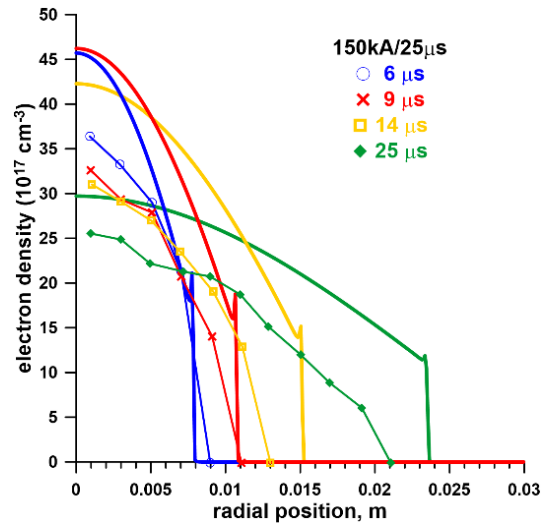


давление

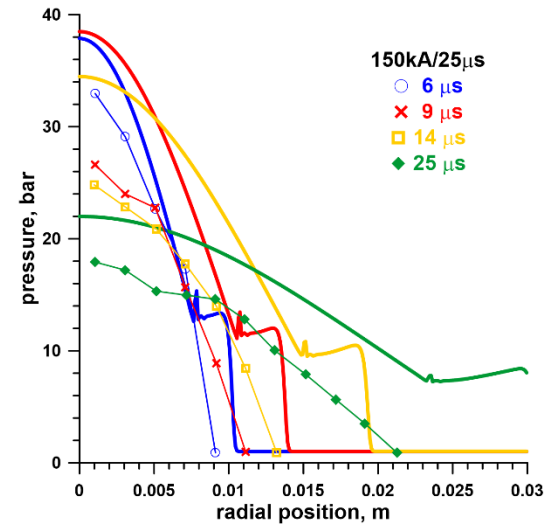
Задача 3. Сильноточный разряд 150 кА/25 мкс [6]



температура

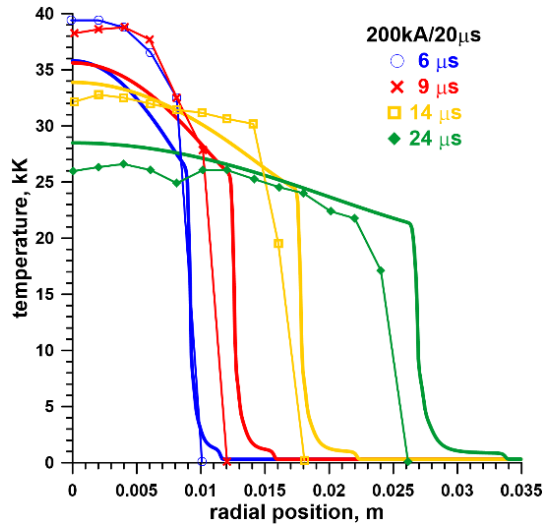


концентрация электронов

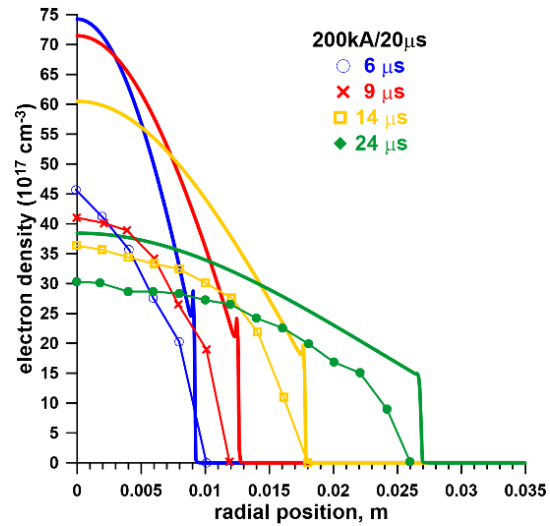


давление

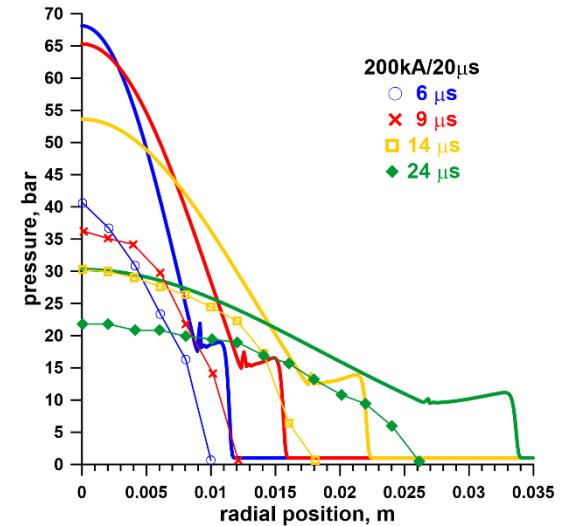
Задача 3. Сильноточный разряд 200 кА/20 мкс [6]



температура

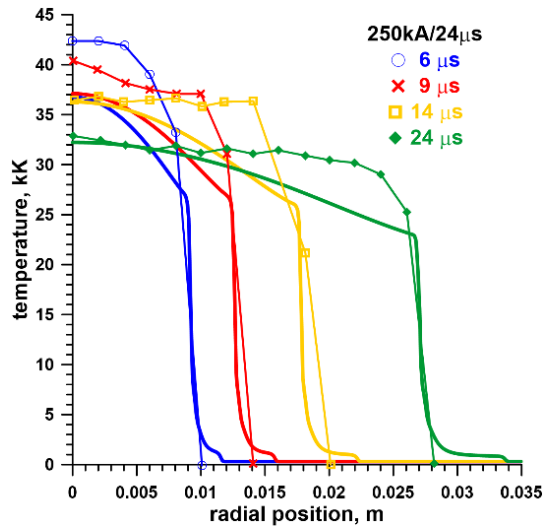


концентрация электронов

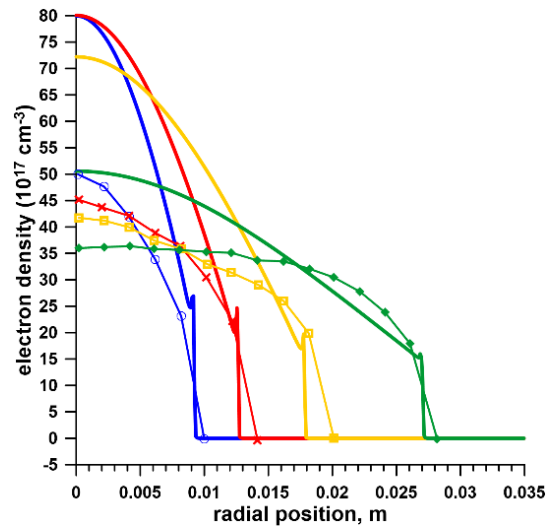


давление

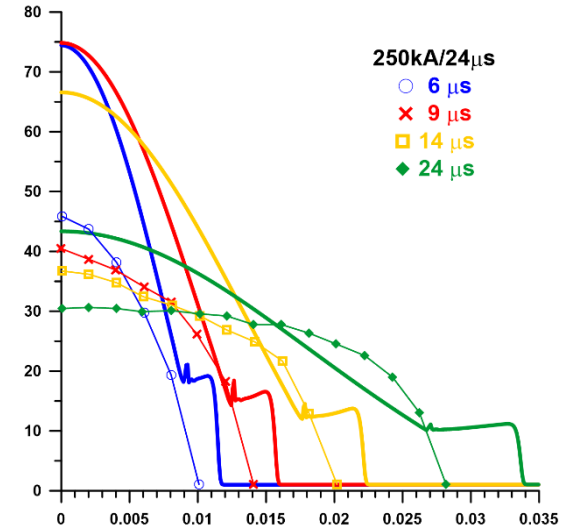
Задача 3. Сильноточный разряд 250 кА/24 мкс [6]



температура

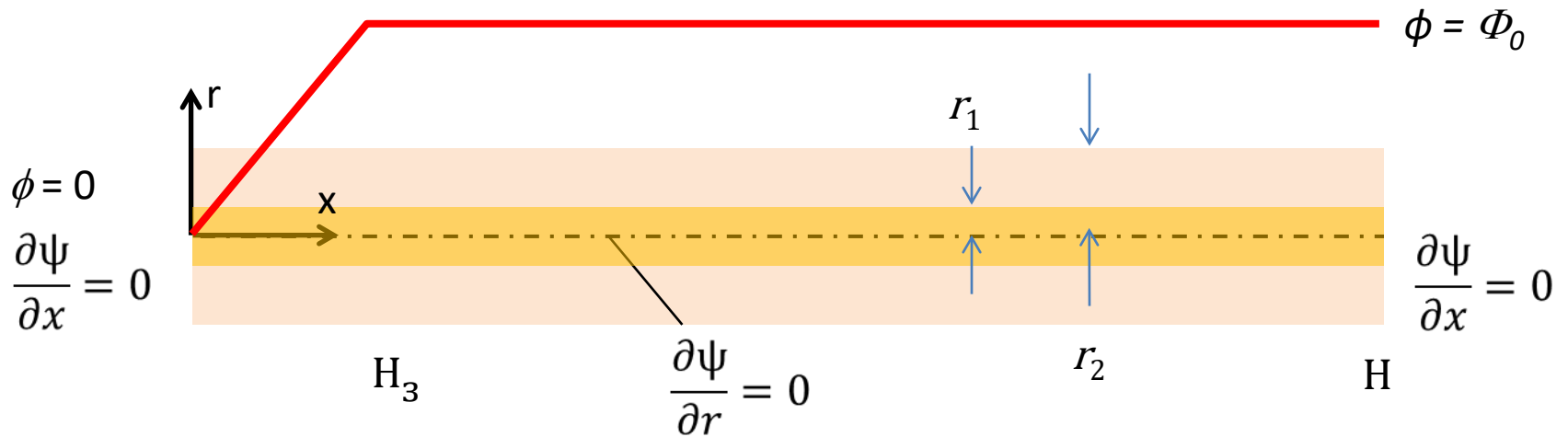


концентрация электронов



давление

К постановке задачи о расчете главной стадии



Начальное состояние

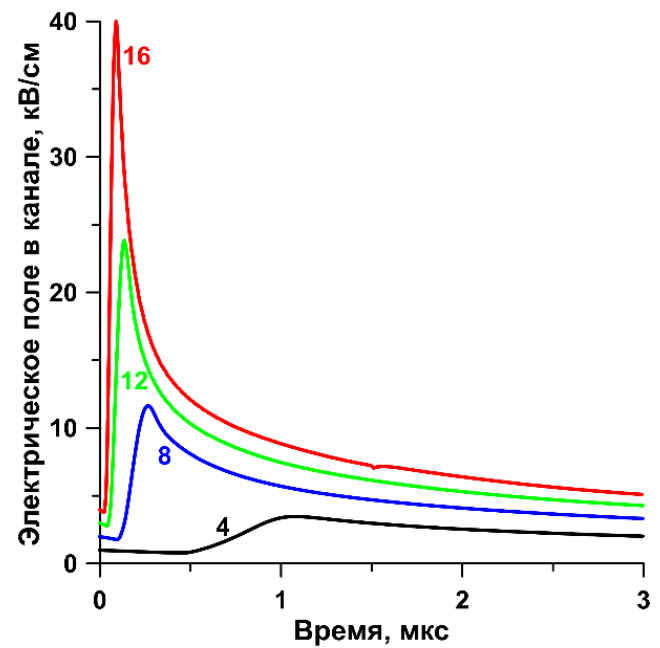
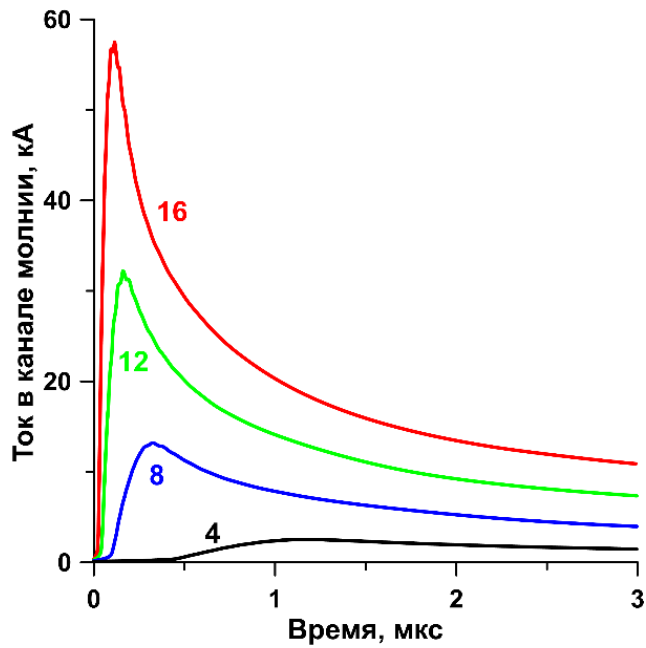
$$\frac{T(r) - T_0}{T_1 - T_0} = 1 - \left(\frac{r}{r_1}\right)^2$$

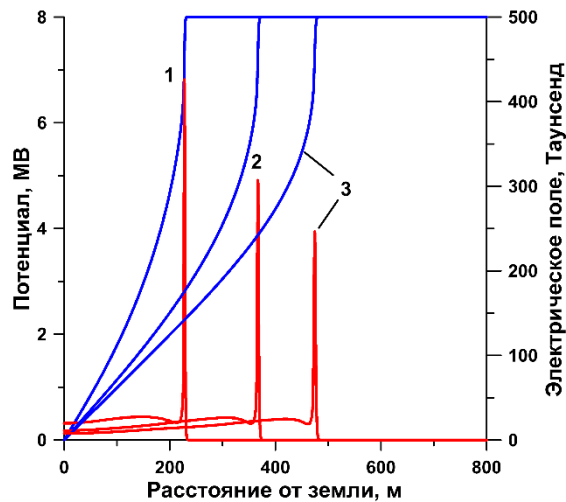
$$T_0 = 300\text{K}, T_1 = 3000\text{-}6000\text{K}$$

$$P_0 = 10^5\text{Па}$$

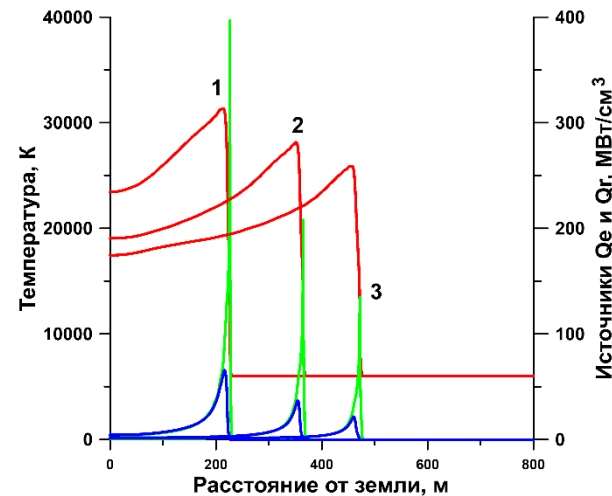
Главная стадия молнии

$T_0 = 300 \text{ K}$, $T_1 = 6000 \text{ K}$, $d = 1 \text{ см}$, $H_3 \sim 100 \text{ м}$

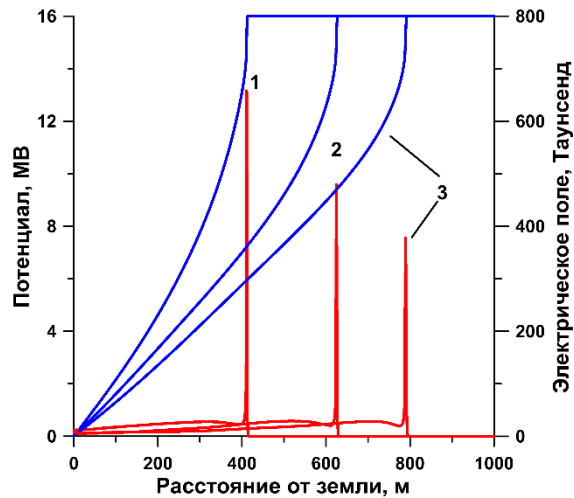




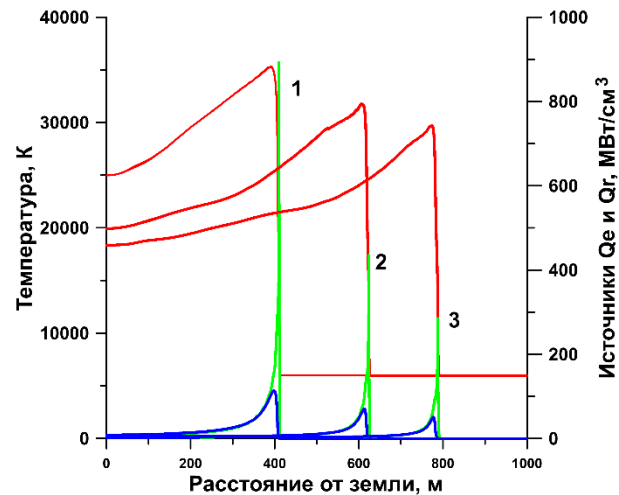
Электрический потенциал (синие) и электрическое поле (красные), $\Phi_0 = 8$ МВ



Температура (красные), электрическая мощность (зеленые), мощность радиационных потерь (синие), $\Phi_0 = 8$ МВ

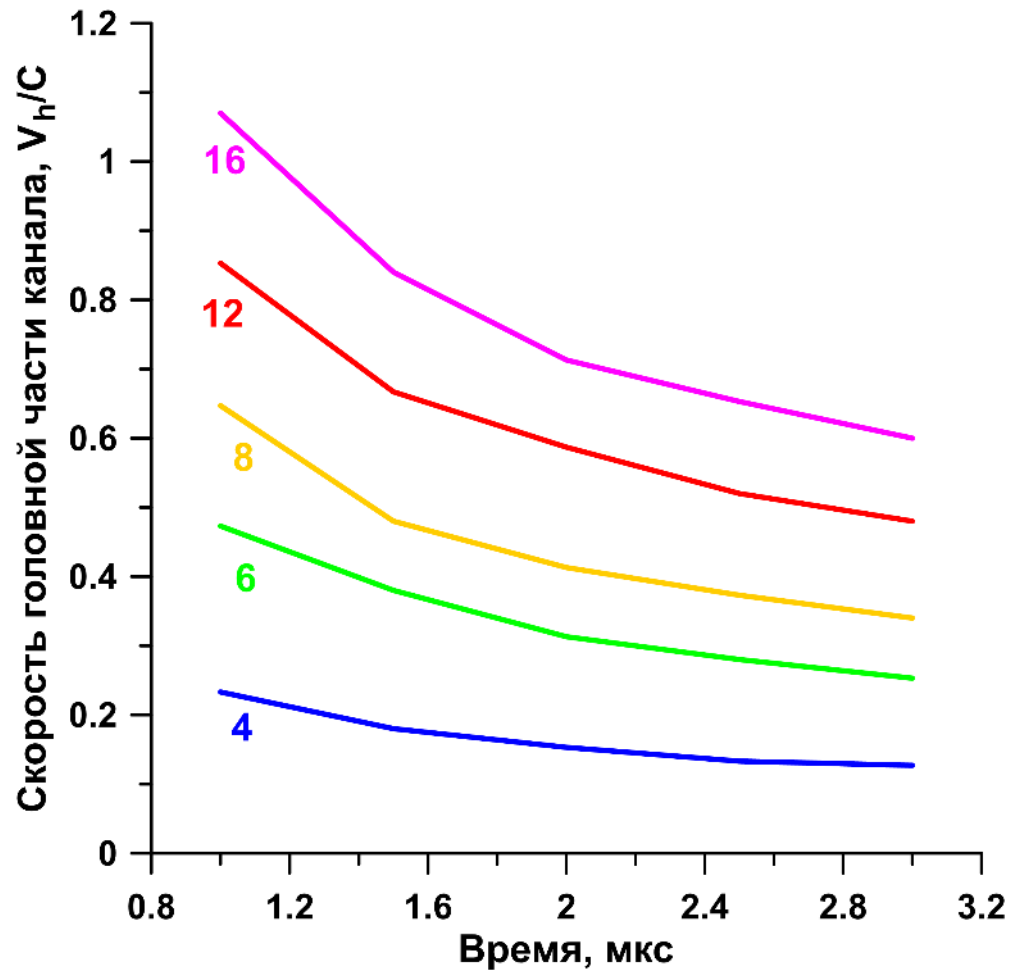


Электрический потенциал (синие) и электрическое поле (красные), $\Phi_0 = 16$ МВ

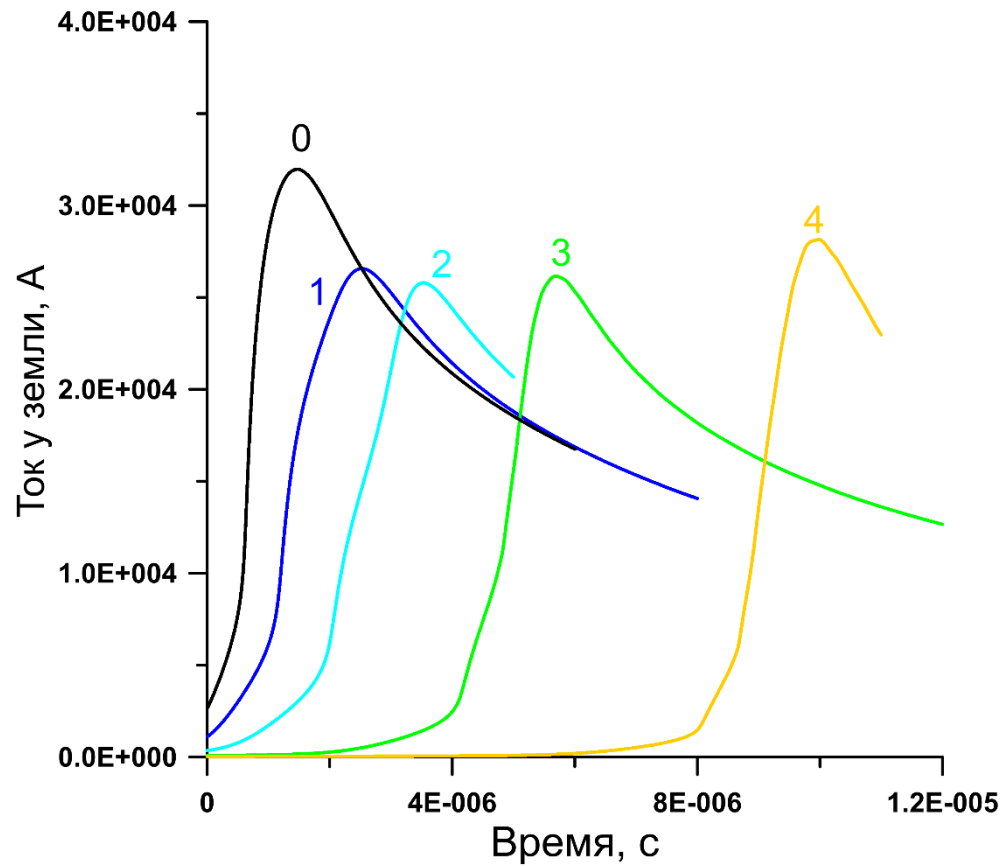


Температура (красные), электрическая мощность (зеленые), мощность радиационных потерь (синие), $\Phi_0 = 16$ МВ

Скорость движения головной части канала молнии в зависимости от потенциала облака Φ_0 . Цифры у кривых – значения потенциала (МВ)

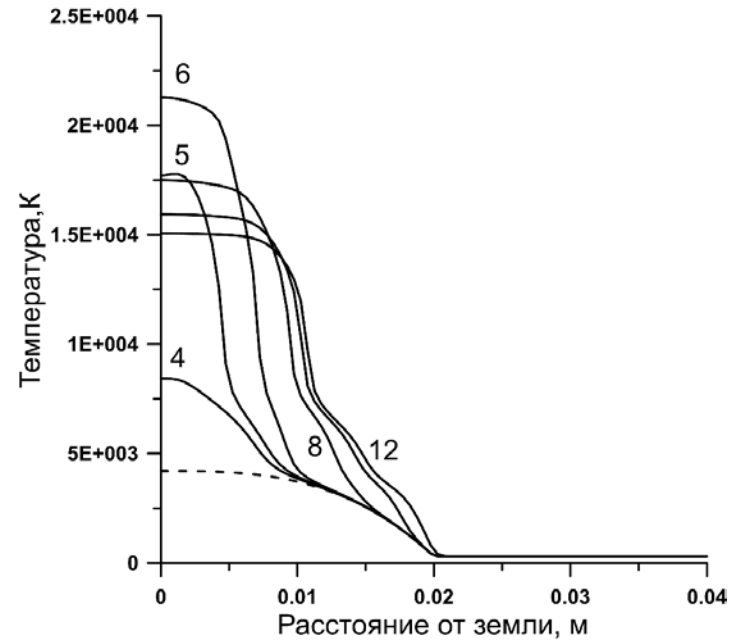
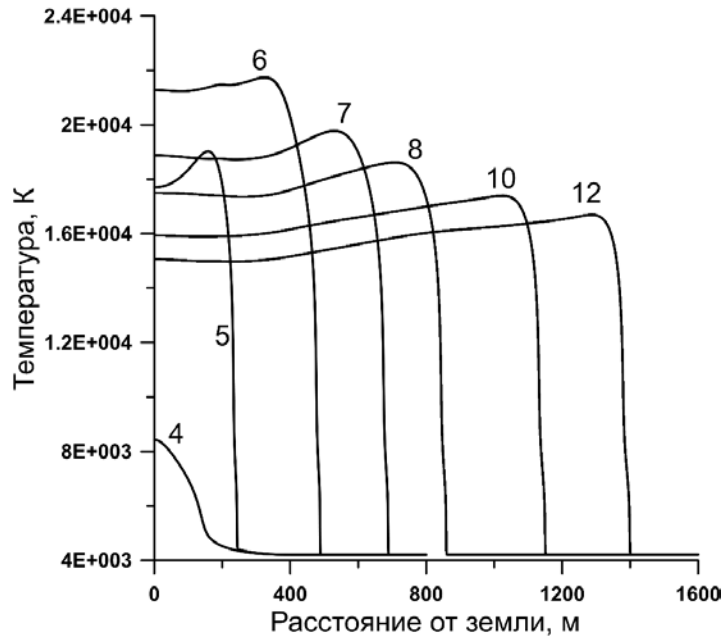


$d = 20\text{мм}$, $T_0 = 300\text{K}$, $H_3 \sim 400\text{ м}$, $0 - T_1 = 6000\text{K}$,
 $1 - T_1 = 5400\text{K}$, $2 - T_1 = 4800\text{K}$, $3 - T_1 = 4200\text{K}$, $4 - T_1 = 3900\text{K}$



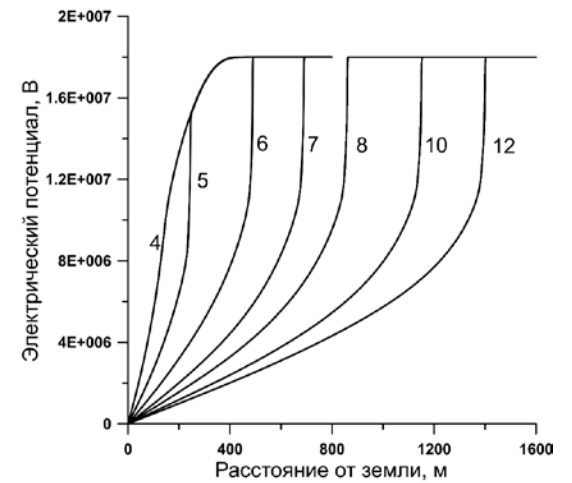
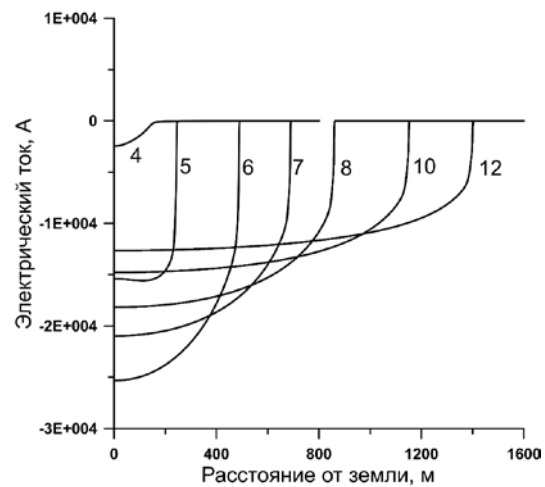
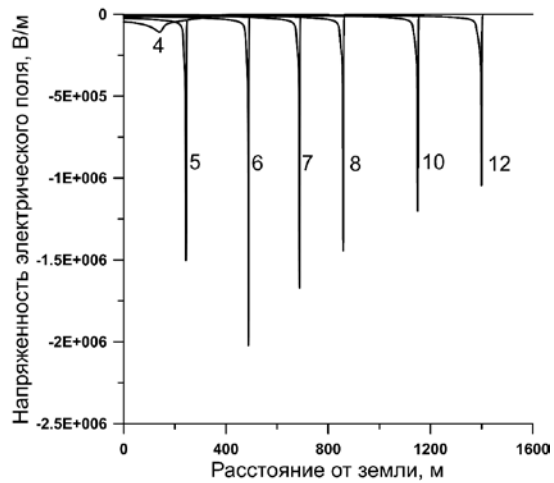
$d = 20\text{мм}$, $T_0=300\text{К}$, $H_3 \sim 400\text{ м}$, $T_1=4200\text{К}$

Цифры – время в микросекундах



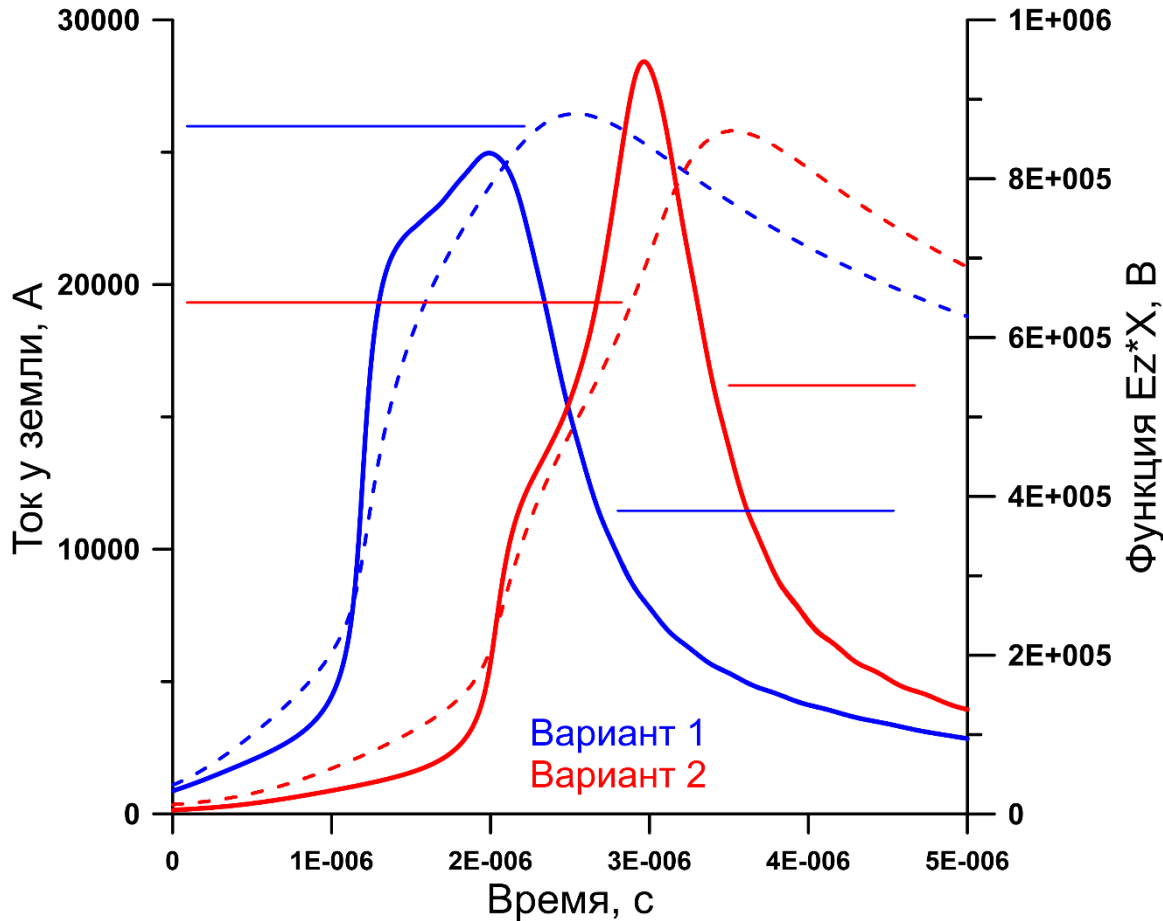
$d = 20\text{мм}$, $T_0=300\text{К}$, $H_3 \sim 400\text{ м}$, $T_1=4200\text{К}$

Цифры – время в микросекундах



Оценка излучения канала молнии в дальней зоне

$$E_z = \frac{1}{4\pi} \int \frac{dV'}{|r-r'|} \left(\mu_0 \frac{\partial J}{\partial t} + \frac{\nabla \rho_0}{\epsilon_0} \right) \text{ в момент времени } t - \frac{|r-r'|}{c}$$



Оценка амплитуды поля E_z на расстоянии $X = 10$ км от разряда:
 $E_z \sim 80$ В/м (Вариант 1)
 $E_z \sim 95$ В/м (Вариант 2)

Заключение

Разработана 2D модель сильноточного разряда в воздухе и 2D модель главной стадии разряда молнии.

Сравнение расчетных и экспериментальных пространственно-временных характеристик сильноточного разряда в воздухе показало хорошее количественное согласие практически по всем характеристикам в широким диапазоне токов разряда. Это позволяет сделать вывод об адекватности разработанной модели для анализа сильноточных разрядов в лабораторных условиях. Кроме того, есть основания считать разработанную модель вполне пригодной для описания характеристик разряда молнии.

Заключение

Характеристики большей части канала молнии (от земли до фронта волны ионизации) определяются балансом мощности тепловыделения от протекающего тока и радиационным охлаждением канала. Расчеты показывают, что эта часть канала всегда остывает со временем, причем это является, главным образом, следствием радиационного охлаждения, а не следствием газодинамического расширения канала. Температура канала молнии у земли остается достаточно высокой, выше 15 кК, т.е. газ является практически полностью ионизованным.

Скорость распространения канала от земли к облаку непосредственно зависит от разности потенциалов между облаком и землей. Чем выше разность потенциалов, тем (в среднем) выше скорость движения. Более высокие значения потенциала облака обеспечивают более высокие электрические поля в головной части разряда, т. е. более быстрый нагрев и «заземление» зоны фронта волны ионизации.

Оценка излучения от разряда молнии выполнена в приближении дальней зоны. На больших расстояниях от зоны разряда электрическое поле определяется не только скоростью движения фронта, но и снижением полного тока в канале.