

Computational Study of the Parameters of an Anomalous Glow Discharge on the Surface of a Gas-Flowed Plate

Sergey T. Surzhikov

*Ishlinskiy Institute for Problems in Mechanics Russian Academy of Sciences (IPMech RAS),
Moscow, 119526, Russia*

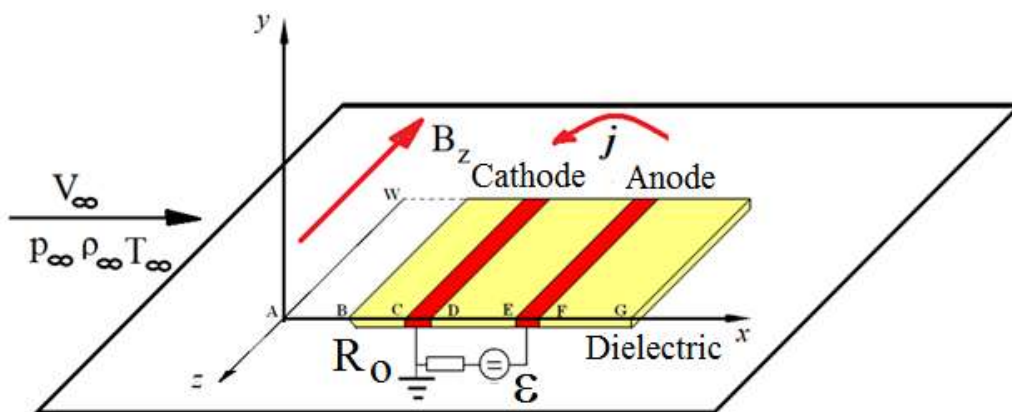
surg@ipmnet.ru

Abstract

The results of calculations of the flow around a sharp plate, on the surface of which a low-power DC glow discharge burns, by a supersonic flow of a viscous, heat-conducting perfect gas in the free flow velocity range $M=6 \div 8$ are presented. The problem was solved in a two-dimensional formulation. The complete Navier – Stokes equations and the equations of electrodynamics of a DC glow discharge in an external magnetic field were integrated numerically. An ambipolar discharge model was used to solve the electrodynamic problem.

The calculated data on the gas-dynamic structure of the compressed layer between the shock wave and the surface of the streamlined plate, as well as the electrodynamic structure of the current channel, are analyzed. The effect of a glow discharge on the distribution of gas-dynamic functions near the surface is shown.

Keywords: compressible gas flow around a sharp plate, Navier – Stokes equations, ambipolar model of a DC glow discharge in an external magnetic field, viscous-inviscid interaction in a compressed layer.



Scheme of the problem of flow around a sharp plate by a supersonic flow of compressible gas, on the surface of which a DC glow discharge burns in an external magnetic field

УДК 533.92:533.6.01

Расчетное исследование параметров аномального тлеющего разряда на поверхности обтекаемой газом пластины

С.Т. Суржиков

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук
Россия, Москва, 119526, проспект Вернадского, д. 101-1*

surg@ipmnet.ru

Аннотация

Представлены результаты расчетов обтекания острой пластины, на поверхности которой горит маломощный тлеющий разряд постоянного тока, сверхзвуковым потоком вязкого, теплопроводного совершенного газа в диапазоне скоростей набегающего потока $M = 6 \div 8$. Задача решалась в двухмерной постановке. Численно интегрировались полные уравнения Навье – Стокса и уравнения электродинамики тлеющего разряда постоянного тока во внешнем магнитном поле. Для решения электродинамической задачи использовалась амбиполярная модель разряда.

Анализируются расчетные данные по газодинамической структуре сжатого слоя между ударной волной и поверхностью обтекаемой пластины, а также электродинамической структуры токового канала. Показано влияние тлеющего разряда на распределения газодинамических функций вблизи поверхности.

Ключевые слова: обтекание острой пластины сжимаемым газом, уравнения Навье – Стокса, амбиполярная модель тлеющего разряда постоянного тока во внешнем магнитном поле, вязко-невязкое взаимодействие в сжатом слое.

1. Введение

В данной работе представлены результаты систематического численного исследования закономерностей обтекания острой пластины, на поверхности которой зажигается тлеющий разряд постоянного тока с внешним магнитным полем, сверхзвуковым потоком вязкого, теплопроводного и сжимаемого газа. Решается сопряженная электро-газодинамическая задача.

Схема задачи показана на рис. 1. На острую пластину набегают сверхзвуковой поток газа с параметрами $p_\infty, \rho_\infty, T_\infty, V_\infty$ (соответственно: давление, плотность, температура и скорость), в результате чего над ее поверхностью образуется классическая конфигурация течения в сжатом слое между фронтом ударной волны и поверхностью, а также в пограничном слое у поверхности.

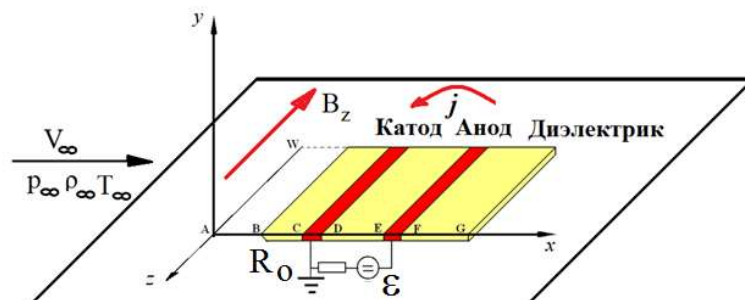


Рис. 1. Расчетная схема задачи

Заподлицо с поверхностью пластины размещены два электрода, расположенные поперек направления газового потока, как это показано на рис. 1. Между электродами зажигается тлеющий разряд постоянного тока с использованием электрической цепи, состоящей из источника питания с электродвижущей силой (э.д.с., \mathcal{E}) и омического сопротивления R_0 . Поперек потоку может накладываться внешнее магнитное поле.

Особенностью решаемой сопряженной задачи является совместное решение системы полных двумерных уравнений Навье – Стокса для определения свойств сжатого и пограничного слоя между фронтом ударной волны и поверхностью, а также системы уравнений тлеющего разряда постоянного тока, дающей описание электродинамической структуры токового столба. Для решения уравнений тлеющего разряда используется амбиполярная модель.

Как видно из рис. 1 электрический ток течёт между двумя электродами, расположенными в плоскости x – y . Внешнее магнитное поле приложено так, что вектор его индукции направлен либо вдоль, либо против оси z . Рассматривается слаботочный тлеющий разряд с типичным током $I \sim 1$ мА при напряжении между электродами $V_g = 100 \div 1000$ Вольт, поэтому собственное магнитное поле не учитывается. Характерная величина модуля индукции внешнего магнитного выбирается в диапазоне $B_z = 0.01 \div 0.5$ Тл.

2. Математическая постановка

Для изучения газодинамической структуры сжатого слоя над поверхностью обтекаемой пластины решается система уравнений Навье – Стокса, неразрывности и теплопроводности вязкого сжимаемого газа в двумерной постановке

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{V}) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho u \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x}(\mu \operatorname{div} \mathbf{V}) + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + F_{B,x}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho v \mathbf{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y}(\mu \operatorname{div} \mathbf{V}) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + F_{B,y}, \quad (3)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p \mathbf{V} \operatorname{grad} T = \frac{\partial p}{\partial t} + \mathbf{V} \operatorname{grad} p + \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + Q_J, \quad (4)$$

где x, y – декартовы координаты; ρ, p – плотность и давление; μ – динамический коэффициент вязкости; c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении; T – температура; λ – коэффициент теплопроводности. Уравнение сохранения энергии здесь записано в форме уравнения Фурье – Кирхгофа.

Система уравнений (1)–(4) используется совместно с термическим и калорическим уравнениями идеального газа

$$p = \rho \frac{R_0}{M_\Sigma} T, \quad c_V = \int_{T_0} c_V(T) dT, \quad (5)$$

где $R_0 = 8.314 \times 10^7$ эрг/(моль·К) – универсальная газовая постоянная; $M_\Sigma = 29$ г/моль – молекулярный вес газа; c_V – удельная теплоемкость при постоянном объеме.

Граничные условия задают невозмущенный набегающий поток (см. рис. 1)

$$x = 0: u = u_\infty, v = 0, T = T_\infty, p = p_\infty, \rho = \rho_\infty \quad (6)$$

и условия второго рода для изменения функций вдоль потоковой координаты x на выходе из расчетной области, где газовый поток считается сверхзвуковым (полагается, что тонкая дозвуковая область в пограничном слое у поверхности не приводит к нарушению устойчивости решения)

$$x = L: \quad \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

На поверхности обтекаемого тела задаются условия прилипания

$$y = 0: \quad u = v = 0, \quad T = T_w, \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \quad (8)$$

где y – нормальная к поверхности координатная линия.

В правой части уравнений, выражающих закон сохранения импульса в проекциях на координатные оси (2), (3) входят компоненты магнитной силы $\mathbf{F}_B = [\mathbf{j} \times \mathbf{B}]$, а в правой части уравнения сохранения энергии (4) – слагаемое Q_J , отвечающее джоулевому тепловыделению в газе, $Q_J = (\mathbf{j} \cdot \mathbf{E})$. Именно эти слагаемые математически связывают газодинамические процессы с электродинамическими процессами, протекающими в электрическом разряде. Здесь: \mathbf{B} – вектор индукции магнитного поля; \mathbf{j}, \mathbf{E} – векторы плотности потока заряженных частиц и напряженности электрического поля. Заметим, что в работах [1, 2] обращается внимание на то, что не полная теплота джоулева выделения идет в нагрев газа, часть аккумулируется во внутренних степенях свободы молекул, а также что несмотря на хорошее описание экспериментальных данных в [3], эффективность силового взаимодействия токового канала с основным потоком газа требует дополнительного исследования.

В расчетах использовались термодинамические и переносные свойства молекулярного азота

$$\mu = 2.6710^{-5} \sqrt{M_A T} \frac{1}{\sigma^2 \Omega^{(2,2)*}}, \quad \Gamma / (\text{см} \cdot \text{с})$$

$$\sigma = 3.68 \text{ \AA}, \quad \Omega^{(2,2)*} = 1.157 (T^*)^{-0.1472}, \quad T^* = \frac{T}{(\varepsilon/k)}, \quad (\varepsilon/k) = 71.4,$$

$$\lambda = 8.334 \times 10^{-4} \sqrt{\frac{T}{M_A}} \frac{0.115 + 0.354 (c_p/R_0) M_A}{\sigma^2 \Omega^{(2,2)*}}, \quad \text{Вт/см} \cdot \text{К}$$

$$c_p = 8.317 \frac{7}{2} \frac{1}{M_A}, \quad M_A = 28 \frac{\text{г}}{\text{моль}}$$

Электродинамические уравнения решаются с использованием амбиполярной модели тлеющего разряда [1]. Аномальный тлеющий разряд горит между двумя плоскими электродами, полностью заполняя их поверхность (в отличие от нормального тлеющего разряда). Важным элементом рассматриваемой задачи является внешняя электрическая цепь из омического сопротивления R_0 и источника э.д.с. ε .

Система уравнений амбиполярной модели аномального тлеющего разряда (АТР) имеет следующий вид [СС]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \text{div}(n\mathbf{V}) = \text{div}(\mu_{e,B}^* D_{a,B} \text{grad} n) + \dot{\omega}_e, \quad (9)$$

$$\text{div} \mathbf{j} = 0, \quad (10)$$

где $\mathbf{V} = u\mathbf{e}_x + v\mathbf{e}_y = (u, v)$ – скорость газового потока в котором присутствуют заряженной частицы; $\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y$ – единичные орты прямоугольной декартовой системы координат; n – концентрация заряженных частиц (в амбиполярной модели концентрации электронов и ионов в газоразрядной плазме полагаются одинаковыми); $\mu_{e,B}^*, D_{a,B}$ – эффективная подвижность электронов и коэффициент амбиполярной диффузии в магнитном поле; μ_e, μ_i – подвижности электронов и ионов; D_i, D_e – коэффициенты диффузии электронов и ионов

$$D_e = \mu_e T_e, \quad D_i = \mu_i T_i;$$

$$D_{a,B} = \frac{\mu_{e,B} D_i + \mu_i D_{e,B}}{\mu_{e,B} + \mu_i}, \quad \mu_{e,B} = \frac{\mu_e}{1 + b_e^2}, \quad D_{e,B} = \frac{D_e}{1 + b_e^2}, \quad \mu_{e,B}^* = \frac{\mu_e}{(1 + b_e^2)\mu_i + \mu_e};$$

$\mu_{e,B}, D_{e,B}$ – подвижность и коэффициент диффузии электронов в магнитном поле; b_e^2 – параметры Холла для электронов (в силу выбранных для исследования параметров тлеющего разряда и величины индукции магнитного поля параметры Холла для электронов могут достигать величины ~ 10 , в то время, как параметры Холла для ионов очень малы, $\sim 10^{-4}$; подробно см. [1]); T_e, T_i – температура электронов и ионов в эВ. В данной работе рассматривается частный двухмерный случай горения тлеющего разряда в поперечном магнитном поле. В общем случае введенные коэффициенты с учетом магнитного поля составляют компоненты тензора подвижности и диффузии.

Правая часть уравнения переноса заряженных частиц (9) содержит источниковое слагаемое

$$\dot{\omega}_e = \alpha |\mathbf{\Gamma}| - \beta n^2, \quad (11)$$

представляющее собой разность между скоростью рождения электронов в результате ударной ионизации нейтральных частиц электронами [2] и их рекомбинации при столкновении с ионами.

В амбиполярном приближении [1] в присутствии магнитного поля

$$\mathbf{\Gamma}_e = \mu_{e,B} n \mathbf{E} - D_{a,B} \text{grad} n, \quad (12)$$

$$\mathbf{\Gamma}_i = \mu_i n \mathbf{E} - D_{a,B} \text{grad} n, \quad (13)$$

где $\mathbf{\Gamma}_e, \mathbf{\Gamma}_i$ – векторы плотностей потоков электронов и ионов; \mathbf{E} – вектор напряженности электрического поля.

Тогда

$$\mathbf{j} = e(\mathbf{\Gamma}_i - \mathbf{\Gamma}_e) = e(\mu_{e,B} - \mu_i) n \mathbf{E}, \quad (14)$$

и уравнение для определения потенциала приобретает вид

$$\text{div}[(\mu_{e,B} - \mu_i) n \mathbf{E}] = 0 \quad (15)$$

Система электродинамических уравнений интегрируется совместно с уравнениями внешней электрической цепи

$$\varepsilon - IR_0 = V_g, \quad (16)$$

$$I = W \int_{x_{C_1}}^{x_{C_2}} j_c dx, \quad (17)$$

где j_c – плотность тока на катодной секции протяженностью W и шириной $(x_{C_2} - x_{C_1})$, где x_{C_2}, x_{C_1} – координаты точек D и C на рис. 1.

Из (15) следует, что в рассматриваемом двухмерном случае при использовании численного метода расчёта на установление для определения электрического потенциала будет решаться уравнение:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(n \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(n \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) = 0 \quad (18)$$

при граничных условиях равенства нулю производных $\frac{\partial \varphi}{\partial \zeta} = 0$ по нормали ζ к границам расчетной области кроме поверхности катода, где $\varphi = 0$ и анода, где $\varphi = V_g$.

Интегрируемые уравнение замыкаются рядом термофизических и электродинамических параметров и функций

$$\begin{aligned} \mu_e &= 4.5 \times 10^5 \frac{1}{p[\text{Тор}]}, \quad \mu_i = 1.45 \times 10^3 \frac{1}{p[\text{Тор}]}, \quad T_e = 1 \text{ эВ}, \quad T_i = 0.0258 \text{ эВ}, \\ \dot{\omega}_e &= \alpha p |\mathbf{E}| \frac{\mu_e(p)}{1+b_e^2} - \beta n^2, \quad \beta = 2 \times 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}, \\ \alpha &= A \exp \left[-\frac{B}{(|\mathbf{E}|/p)} \right], \quad \text{Тор}^{-1} \text{см}^{-1}, \end{aligned} \quad (19)$$

где
$$A = 12 \frac{1}{\text{см} \cdot \text{Торр}}, \quad B = 342 \frac{\text{В}}{\text{см} \cdot \text{Торр}}$$

В расчетах использованы следующие размерности коэффициентов и функций:

$$\begin{aligned} e &= 1.6 \times 10^{-19} \text{ К}, \quad [n] = \text{см}^{-3}, \quad [\mu_e] = [\mu_i] = \text{см}^2/(\text{с} \cdot \text{В}), \quad [\alpha] = \text{Тор}^{-1} \text{см}^{-1}, \\ [E] &= \text{В/см}, \quad [B] = \text{Т}, \quad [j] \sim [en\mu_e E] = \text{А/см}^2, \quad [T_e] = [T_i] = \text{эВ}, \quad [D_e] = [D_i] = \text{см}^2/\text{с}, \\ [Q_J] &\sim [\eta en\mu_e E^2] = \text{Вт/см}^2, \quad [F_M] \sim [10^5 en\mu_e EB] = \text{Г/(см} \cdot \text{с}^2) = \text{дин/см}^2 \end{aligned}$$

3. Система безразмерных уравнений амбиполярной модели электродинамики аномального тлеющего разряда

Исходные уравнения в двухмерной геометрии имеют следующий вид:

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial un}{\partial x} + \frac{\partial vn}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e^* D_{a,B} \frac{\partial n}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e^* D_{a,B} \frac{\partial n}{\partial y} \right) + \dot{\omega}_e, \quad (20)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(n \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(n \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) = 0 \quad (21)$$

Представим систему уравнений (20)–(21) в безразмерном виде, выбрав в качестве нормирующих комплексов $Q_n = \frac{L}{n_0 V_\infty}$, $Q_\varphi = \frac{L^2}{n_0 E}$

$$\frac{\partial \tilde{n}}{\partial \tau} + \frac{\partial \tilde{u}\tilde{n}}{\partial \tilde{x}} + \frac{\partial \tilde{v}\tilde{n}}{\partial \tilde{y}} = \frac{\partial}{\partial \tilde{x}} \left[\mu_e^* \left(\frac{D_{a,B}}{L V_\infty} \right) \frac{\partial \tilde{n}}{\partial \tilde{x}} \right] + \frac{\partial}{\partial \tilde{y}} \left[\mu_e^* \left(\frac{D_{a,B}}{L V_\infty} \right) \frac{\partial \tilde{n}}{\partial \tilde{y}} \right] + \tilde{\omega}_e, \quad (22)$$

$$\frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial \tilde{x}} \left(\tilde{n} \frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial \tilde{x}} \right) + \frac{\partial}{\partial \tilde{y}} \left(\tilde{n} \frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial \tilde{y}} \right) = 0, \quad (23)$$

где
$$\tilde{n} = \frac{n}{n_0}, \quad \tilde{\varphi} = \frac{\varphi}{E}, \quad (\tilde{x}, \tilde{y}) = \left(\frac{x}{L}, \frac{y}{L} \right), \quad (\tilde{u}, \tilde{v}) = \left(\frac{u}{V_\infty}, \frac{v}{V_\infty} \right)$$

Производные по времени τ в уравнениях (22), (23) не имеют физического смысла и введены в эти уравнения для использования численной процедуры установления.

Скорость ионизации в правой части (22) преобразуется к виду

$$\tilde{\omega}_e = \alpha p \mu_{e,B} \tilde{n} \sqrt{\left(\frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial \tilde{x}} \right)^2 + \left(\frac{\partial \tilde{\varphi}}{\partial \tilde{y}} \right)^2} \frac{E}{V_\infty} - \beta \tilde{n}^2 \frac{L n_0}{V_\infty}$$

Граничные условия для электродинамических уравнений формулируются для концентрации заряженных частиц и электрического потенциала

$$x = 0: \quad n_{i,j=1} = n_{\min}, \quad \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)_{i,j=1} = 0, \quad i = 1, \dots, NI,$$

$$x = L_x: \quad \left(\frac{\partial n}{\partial x} \right)_{i,j=NJ} = 0, \quad \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)_{i,j=NJ} = 0, \quad i = 1, \dots, NI,$$

$$y = 0, \quad x_{1,j} < x_{C_1}, \quad x_{C_2} < x_{1,j} < x_{A_1}, \quad x_{1,j} > x_{A_2}: \quad n_{1,j} = n_{\min}, \quad \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)_{1,j} = 0, \quad j = 1, \dots, NJ,$$

$$y = 0, \quad x_{C_1} < x_{1,j} < x_{C_2}: \quad \left(\frac{\partial n}{\partial y} \right)_{1,j} = 0, \quad \varphi_{1,j} = 0, \quad j = 1, \dots, NJ,$$

$$y = 0, \quad x_{A_1} < x_{1,j} < x_{A_2}: \quad \left(\frac{\partial n}{\partial y} \right)_{1,j} = 0, \quad \varphi_{1,j} = V_g, \quad j = 1, \dots, NJ,$$

$$y = L_y, \quad \left(\frac{\partial n}{\partial y} \right)_{i=NI,j} = \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)_{i=NI,j} = 0, \quad j = 1, \dots, NJ$$

Здесь x_{A_2}, x_{A_1} – координаты точек F и E на рис. 1; NI, NJ – число точек конечно-разностной сетки вдоль осей y и x соответственно. Значения координат границ катода и анода приведены в таблице 1.

Граничные условия для газодинамических уравнений являются классическими для задачи ламинарного пограничного слоя на пластине в сверхзвуковом потоке

$$x = 0: \quad u_{i,j=1} = V_\infty, \quad v_{i,j=1} = 0, \quad \rho_{i,j=1} = \rho_\infty, \quad T_{i,j=1} = T_\infty \quad i = 1, \dots, NI,$$

$$x = L_x: \quad \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{i,j=NJ} = \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)_{i,j=NJ} = \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \right)_{i,j=NJ} = \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{i,j=NJ} = 0, \quad i = 1, \dots, NI,$$

$$y = 0: \quad u_{1,j} = v_{1,j} = 0, \quad T_{1,j} = T_w, \quad \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)_{1,j} = 0; \quad j = 1, \dots, NJ,$$

$$y = L_y: \quad \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{i=NI,j} = \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)_{i=NI,j} = \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{i=NI,j} = \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \right)_{i=NI,j} = 0; \quad j = 1, \dots, NJ$$

4. Результаты численного моделирования

Для исследования взаимодействия аномального тлеющего разряда со сверхзвуковым потоком газа у поверхности пластины был выбран следующий диапазон определяющих газодинамических параметров: давление $p_\infty = 0.635$ Тор, скорость $M = 5 \div 8$, температура $T_\infty = 41 \div 290$ К. Температура поверхности полагалась постоянной и равной $T_w = 290$ К. Тем самым исключалось влияние нагрева электродов, что обычно наблюдается в экспериментах и было исследовано в [3, 4].

Электродинамические исходные данные задавались диапазоне $\varepsilon = 300 \div 1000$ В, $R_0 = 12 \div 300$ кОм, модуль индукции магнитного поля от $B_z = -0.5$ до $+0.5$ Тл.

Как уже отмечалось, в качестве базового варианта выбраны условия, для которых проводился эксперимент в работе [4]. В работе [3], где анализировались условия этого эксперимента, учитывался нагрев, что, как оказалось, оказывает заметное влияние на распределения вдоль поверхности коэффициентов давления и трения

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{0.5 \rho_\infty V_\infty^2}, \quad C_f = \frac{\tau_w}{0.5 \rho_\infty V_\infty^2},$$

а также коэффициентов теплообмена

$$C_h = St = \frac{q_w}{0.5 \rho_\infty V_\infty^3},$$

где τ_w, q_w – напряжение трения и плотность конвективного теплового потока к поверхности.

На рис. 1 дана расчётная схема. Исходные данные ко всем расчётным вариантам приведены в подписях к рисункам, на которых представлены расчётные данные и в табл. 1. На рис. 2–21 показаны данные для шести вариантов.

В первых трех сериях расчётных данных, рис. 2–13, изучается влияние э.д.с. источника питания и индукции магнитного поля на электродинамические характеристики тлеющего разряда и на величины коэффициентов давления и трения вдоль обтекаемой поверхности при давлении $p = 0.6$ Тор, $\varepsilon = 150$ В, $R_0 = 12$ кОм.

Выполним общий обзор представленных данных. В первых трёх сериях (рис. 2–5, 6–9, 10–13) увеличивается э.д.с. источника питания от $\varepsilon = 150$ В до $\varepsilon = 300$ В. В пределах каждой серии рассмотрены 4 варианта с разными абсолютными значениями и противоположными поляризациями внешнего магнитного поля $B_z = +0.1$ Тл, $+0.3$ Тл и -0.1 Тл, -0.3 Тл.

Параметры газового потока и омическое сопротивление внешней цепи остаются неизменными. Поперечная к потоку протяжённость электродов секции (см. рис. 1) полагалась равной 3 см. В четвертой расчётной серии (рис. 14 и 15) при той же скорости $M = 5$ увеличивается температура набегающего потока газа, э.д.с. источника питания и омическое сопротивление во внешней цепи. В этом случае длина катодной и анодной секции равняется 1 см.

В пятой расчётной серии при $M = 5$ и $T = 296$ К задавались наибольшее значение э.д.с. и наименьшее значение омического сопротивления. Очевидно, что в этом случае ожидаются большие падения напряжения между электродными секциями. Расчёты выполнены при четырёх значениях индукции магнитного поля.

И, наконец, в шестой расчётной серии задавалась наибольшая скорость газового потока ($M = 8$) при давлении $p = 0.6$ Тор и $T = 41.5$ К.

Для каждого из расчётных вариантов даны поля электронных и ионных концентраций (например, рис. 1, а), электрического потенциала (рис. 1, б), плотности тока (рис. 1, в). Для некоторых вариантов показаны также поля газодинамических функций: температуры (см., например, рис. 16, з), давление (рис. 16, д) и скорости (рис. 16, е).

Эти данные интересны тем, что для соответствующих расчётных случаев наблюдался заметный снос заряженных частиц вдоль обтекаемой поверхности (см., например, рис. 15, а).

В ряде случаев наблюдается заметное влияние тлеющего разряда на распределение давления и скорости вблизи поверхности (рис. 17, *д* и рис. 17, *е*).

Каждая расчётная серия характеризуется распределением концентрации зарядов и напряжённости электрического поля E_y вдоль поверхности пластины (рис. 2, *г*–13, *г* и рис. 14, *ж*–21, *ж*). Эти данные интересны тем, что они показывают степень неоднородности концентраций зарядов и напряжённости электрического поля вблизи электродных секций.

На рис. 2, *д*, *е*–13, *д*, *е* и рис. 14, *з*, *и*–21, *з*, *и* даны распределения коэффициентов давления и теплообмена вдоль обтекаемой пластины. И, наконец, на рис. 2, *ж*–13, *ж* и рис. 14, *к*–21, *к* показаны компоненты магнитной силы, действующей на токовый канал вблизи поверхности.

Рассмотрим для примера рис. 2, *ж*. Компонента силы $F_{m,y}$ отрицательна над катодом и анодом, а компонента силы $F_{m,x}$ положительна над катодом и отрицательна над анодом. Для объяснения этого уместно вспомнить мнемоническое правило левой руки в электродинамике (при определении положительного направления тока и вектора индукции). Это означает, что для расчётного варианта, результаты которого показаны на рис. 2, магнитная сила прижимает поток частиц к поверхности, ускоряет их у катода и тормозит у анода. Аналогичные выводы делаются по другим расчётным вариантам.

Это пример наименее мощного тлеющего разряда $V_g I = 0.4$ В·А. Тем не менее, концентрация заряженных частиц достигает здесь величины 10^{10} см⁻³. Для столь маломощного разряда, близкого к порогу своего погасания, заметно сказывается поляризация магнитного поля. При $B = +(0.1 \div 0.3)$ Тл ток через разрядный промежуток составляет $I = 5$ мА, а при $B = -(0.1 \div 0.3)$ Тл возрастает примерно в 2 раза. Возрастание тока приводит почти к двухкратному падению напряжения от $V_g = 80$ В до 44 В. При этом концентрация электронов и ионов также возрастает.

Сравнение полей концентрации частиц (рис. 2, *а*–5, *а*), потенциала (рис. 2, *б*–5, *б*) и плотности тока (рис. 2, *в*–5, *в*) показывает на отсутствие качественных изменений при увеличении индукции магнитного поля и его поляризации.

Между электродами наблюдается область повышенной концентрации электронов и соответствующая ей область протекания тока. Вдоль границ электродных секций наблюдаются локальные максимумы концентрации заряженных частиц и плотности тока (рис. 5, *а*, *в*). На рис. 2, *г*–5, *г* видно, что концентрация зарядов над катодной и анодной секциями изменяется на несколько порядков. Хорошо видны также скачки напряжённости электрического поля E_y вблизи границ электродов (рис. 2, *г*–5, *г*). Заметим, что между электродами напряжённость электрического поля также остаётся весьма высокой. Это следствие постановки граничных условий второго рода для электрического потенциала на границе с диэлектриком.

Представляет большой интерес последствия, к которым приводит действие объёмной магнитной силы на газовый поток. На рис. 2, *д*–5, *д* видно, что в случае, когда магнитная сила прижимает поток к поверхности, наблюдается возрастание коэффициента давления, а при отталкивании коэффициент давления уменьшается. Очевидна корреляция с абсолютной величиной индукции магнитного поля. С её увеличением отмеченный эффект становится всё более сильным. Также заметим, что на рис. 2, *а*, *в*–5, *а*, *в* виден факт отеснения такого канала от поверхности при положительных значениях объёмной магнитной силы. Изменения в плотностях теплового конвективного потока поверхности в рассматриваемой расчётной серии проявляются незначительно (при $B_z = \pm 0.1$ Тл). Для магнитного поля $B_z = \pm 0.3$ Тл на рис. 3, *е* и, особенно на рис. 5, *е*, наблюдаются уже заметные изменения.

Ускорение потока за счёт действия объёмной магнитной силы приводит к падению St на промежутке между электродами (рис. 3, *е*). А торможение потока у катода при $B_z = -0.3$ Тл (рис. 5) приводит к возрастанию теплового потока поверхности.

В заключение анализа результатов первой расчётной серии отметим, что распределение электрического потенциала остаётся подобным для разных вариантов.

Последующие 2 расчётные серии демонстрируют эффект увеличения э.д.с. источника питания. Расчётные данные на рис. 6, 7 и рис. 8, 9 ($\varepsilon = 200$ В) и на рис. 10, 11 и рис. 12, 13

($\varepsilon = 300$ В) свидетельствуют об увеличении влияния тлеющего разряда на газовую динамику пограничного слоя. В расчётах отмечается примерно трёхкратное возрастания концентрации электронов в толковом столбе и плотности тока. Вблизи границ электродов степень неоднородности электродинамических функций увеличивается. Заметим, что дальнейшее увеличение э.д.с. до $\varepsilon = 500 \div 700$ В приводило к возникновению численных неустойчивостей.

Сравнение величины объёмной магнитной силы для этих вариантов показывает отчётливую тенденцию её возрастания при увеличении э.д.с. и индукции магнитного поля. Также отмечается всё большее влияние на величины плотности конвективных тепловых потоков. По мере увеличения э.д.с. и, как следствие, концентрации заряженных частиц обращает на себя внимание увеличение толщины токового канала и появление асимметрии в распределение концентрации, связанной с наличием потока газа вдоль поверхности (см. последовательно рис. 3, а; 7, а; 11, а для $B_z = +0.3$ Тл и рис. 5, а; 9, а; 13, а для $B_z = -0.3$ Тл). Кроме этого примечательно более сильное изменение коэффициентов давления и теплообмена. Во всех рассмотренных случаях коэффициенты трения и теплового потока, обусловленные трением, изменяются незначительно.

Получение решения задачи при увеличении э.д.с. до $\varepsilon = 700$ В оказалось возможным при одновременном увеличении давления набегающего потока газа до $p_\infty = 5$ Тор и температуры до $T_\infty = 296$ К. На рис. 14, 15 показаны расчетные данные для индукции магнитного поля $B_z = +0.5$ и $B_z = -0.5$ Тл соответственно. Наиболее заметные изменения состоят в следующем:

- 1) наблюдается снос частиц вниз по потоку (рис. 14, а и 15, а);
- 2) изменяется конфигурация поля электрического потенциала (рис. 14, б и 15, б);
- 3) увеличивается напряженность электрического поля у поверхности катода и анода (рис. 14, ж и 15, ж).

Несмотря на заметное увеличение максимальных значений объёмной магнитные силы у границ электродов, их воздействие на распределение вдоль поверхности коэффициентов давления и теплообмена оказалось малым. При этом из рис. 14, д и 15, д видно незначительное изменение давления в пограничном слое над электродами.

В пятой расчётной серии рис. 16–19 э.д.с. увеличена до $\varepsilon = 1500$ В при $p_\infty = 5$ Тор и $M = 5$. Однако, в отличие от предыдущей серии, где омическое сопротивление $R_0 = 300$ кОм, здесь омическое сопротивление снижено до $R_0 = 12$ кОм. Это привело к увеличению падения напряжения на электродах до $V_g = 400$ В против $V_g = 300$ В предыдущей серии. В данном случае отметим весьма сильное влияние на распределение коэффициентов давления и теплообмена вдоль поверхности. Заметно возрастает концентрация зарядов и напряжённость электрического поля у поверхности. Также хорошо видны изменения в газодинамической структуре – давления и скорости у поверхности (рис. 16, д, е; 17, д, е; 18, д, е и 19, д, е).

В заключительной шестой серии расчётов при давлении $p_\infty = 0.6$ Тор, температуре $T_\infty = 41.5$ К, э.д.с. $\varepsilon = 300$ В и омическом сопротивлении $R_0 = 12$ кОм исследованы условия, формируемые более высокоскоростным потоком ($M = 8$) в разреженном газе. Отметим незначительное влияние разряда на распределение коэффициентов теплообмена и давления вдоль поверхности, но при этом сильный снос зарядов вдоль потока (рис. 20, а и 21, а). Как следствие, наблюдается заметная деформация токового слоя (рис. 20, в и 21, в). В этом случае основные параметры разряда оказались близкими первой расчётной серии (рис. 11, 13).

5. Заключение

Выполнено численное моделирование аномального тлеющего разряда между двумя плоскими электродами, размещенными на поверхности заостренной пластины, обтекаемой сверхзвуковым потоком газа. Поперек газовому потоку и токовому каналу тлеющего разряда приложено магнитное поле индукцией до 0.5 Тл. Учтена внешняя электрическая цепь разряда, состоящая из источника питания и омического сопротивления. Задача решена в двухмерной постановке с использованием амбиполярной модели тлеющего разряда, модифицированной

для учета внешнего магнитного поля. Особенностью аномального тлеющего разряда является то, что токовый канал занимает всю поверхность электродов.

Исследовано влияние э.д.с. источника питания (в диапазоне $\varepsilon = 150 \div 1500$ В) и омического сопротивления (в диапазоне $R_0 = 12 \div 300$ кОм), а также параметров набегающего газового потока на устойчивость аномального тлеющего разряда и такие интегральные параметры задачи, как суммарный ток через газоразрядный промежуток, падение напряжения между электродами, распределение коэффициентов давления и трения вдоль обтекаемой пластины.

Главным результатом выполненного исследования является построение экономичной амбиполярной модели аномального тлеющего разряда, модифицированной для учета внешнего магнитного поля и изучение поведения такого разряда в сверхзвуковом потоке разреженного газа при давлении набегающего потока $p_\infty = 0.6 \div 5$ Тор.

В заключение заметим, что в данной работе не были рассмотрены детали физической кинетики тлеющего разряда [5, 6], что планируется сделать в ближайшем будущем.

Благодарности и ссылки на гранты

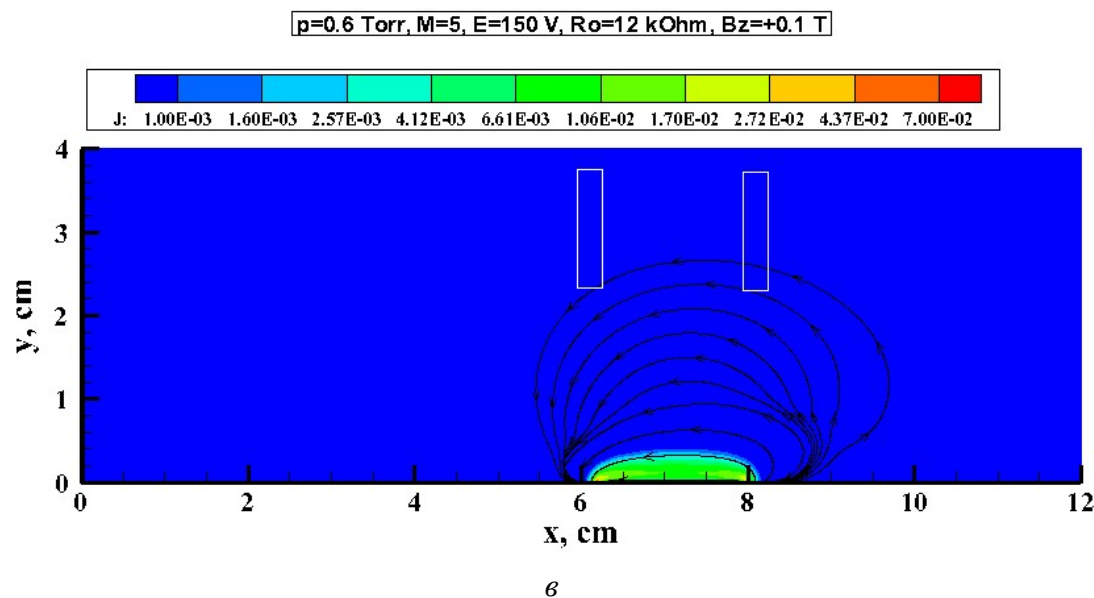
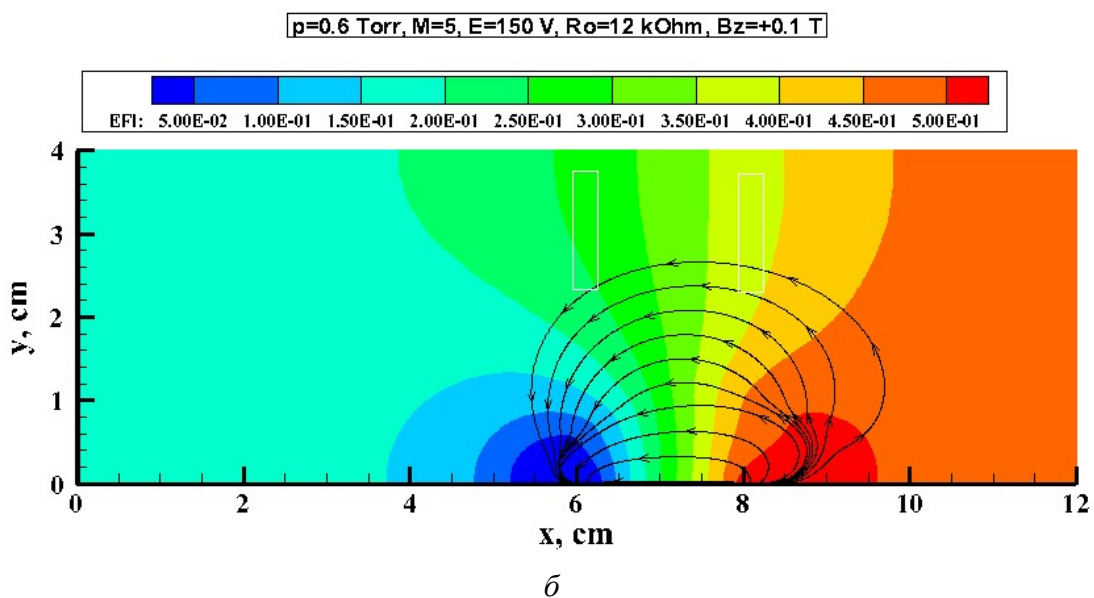
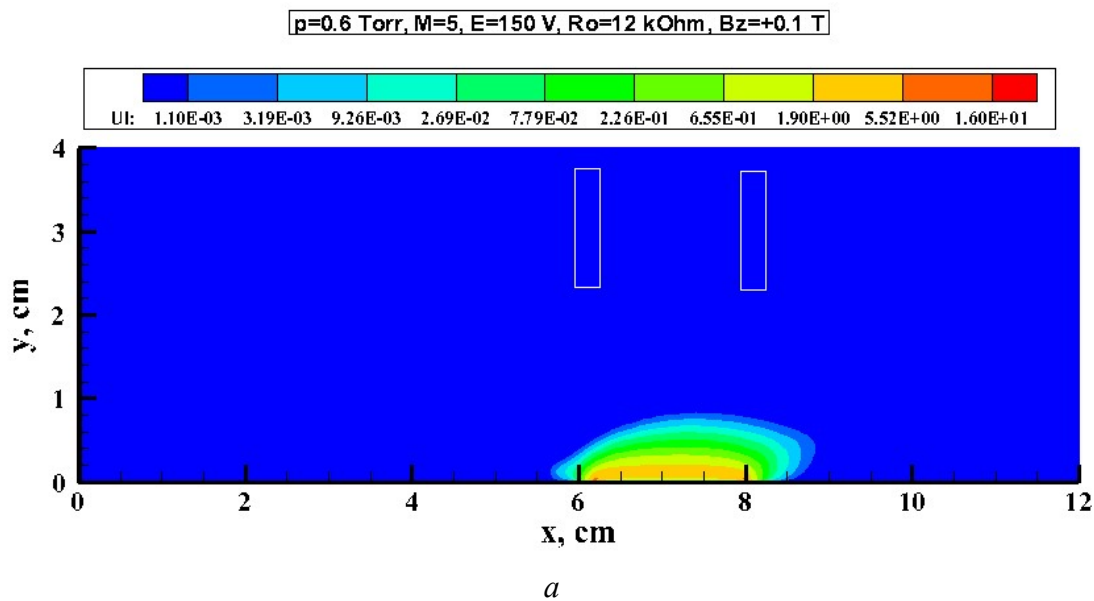
Работа выполнена в рамках гранта РФФИ №22-11-00062.

Литература

1. Суржиков С.Т. Физическая механика газовых разрядов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2006. 640 с.
2. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: «Наука». Главная редакция физико-математической литературы. 591 с.
3. Суржиков С.Т., Шенг Д.С. Вязкое взаимодействие на плоской пластине с поверхностным разрядом в магнитном поле//Теплофизика высоких температур. 2005. Т. 43. № 1. С. 21–31.
4. Menart J., Shang J. S., Kimmel R., and Hayes J. Effect of Magnetic Fields on Plasma Generated in a Mach 5 Wind Tunnel//AIAA Paper 2003-4165. 2003. 13 p.
5. Сторожев Д.А., Куратов С.Е., Суржиков С.Т. Численное моделирование 2D структуры тлеющего разряда в молекулярном водороде с учетом кинетики ионизации и диссоциации//Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2015. Т. 16, вып. 4. <http://chemphys.edu.ru/issues/2015-16-4/articles/566/>
6. Сторожев Д.А., Суржиков С.Т., Куратов С.Е. Анализ кинетических процессов в тлеющем разряде в молекулярном водороде//Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т. 15, вып. 6. <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-6/articles/267/>

References

1. Surzhikov, S. T., *Theoretical and Computational Physics of Gas Discharge Phenomena. Texts and Monographs in Theoretical Physics*, Walter de Gruyter GmbH, Berlin/Boston, 2020, 537 p.
2. Raizer, Yu. P., *Gas Discharge Physics*, Springer-Verlag, 1991, 449 p.
3. Surzhikov, S. T., Shang, J. S., “Viscous Interaction on a Flat Plate with a Surface Discharge in Magnetic Field,” *High Temperature*, Vol. 43, No. 1, 2005, pp. 19–30.
4. Menart, J., Shang, J. S., Kimmel, R., and Hayes, J., “Effect of Magnetic Fields on Plasma Generated in a Mach 5 Wind Tunnel,” *34th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference*, AIAA Paper 2003-4165, June 2003. <https://doi.org/10.2514/6.2003-4165>
5. Storozhev, D., Kuratov, S., Surzhikov, S., “Numerical simulation of 2D structure of the glow discharge in molecular hydrogen in view of ionization and dissociation kinetics,” *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, Vol. 16, No. 4, 2015. <http://chemphys.edu.ru/issues/2015-16-4/articles/566/>
6. Storozhev, D., Surzhikov, S., Kuratov, S., “Analysis of kinetic processes in the glow discharge in molecular hydrogen,” *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, Vol. 15, No. 6, 2014. <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-6/articles/267/>



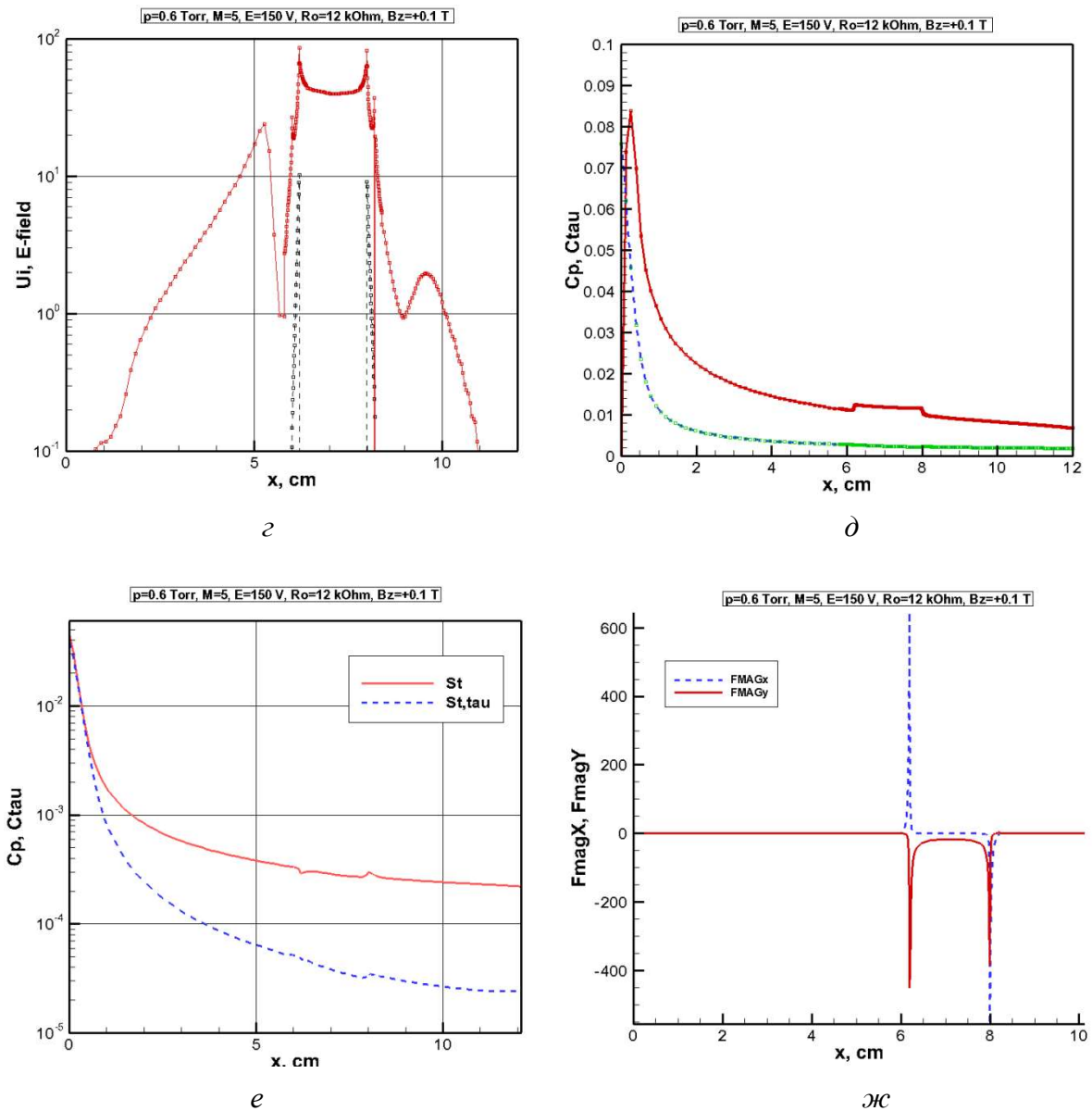
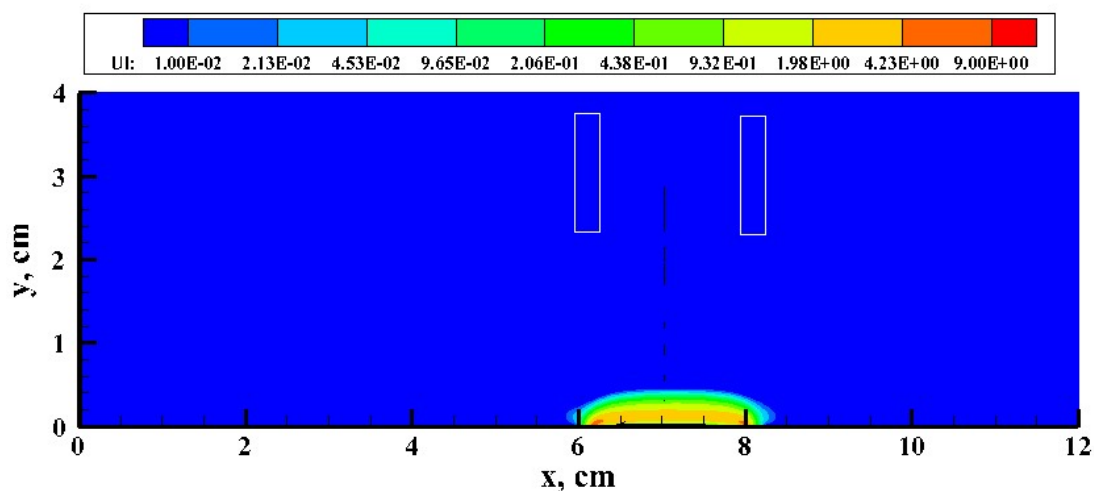


Рис. 2. Аномальный тлеющий разряд между двумя плоскими электродами, расположенными на поверхности обтекаемой пластины при исходных данных: $p_\infty = 0.784 \times 10^3$ эрг/см³ ($p_\infty = 0.6$ Тор), $\rho_\infty = 0.636 \times 10^{-5}$ г/см³, $T_\infty = 41.5$ К, $V_\infty = 0.676 \times 10^5$ см/с ($M=5$), $\varepsilon = 150$ В, $R_0 = 12$ кОм, $B_z = +0.1$ Тл

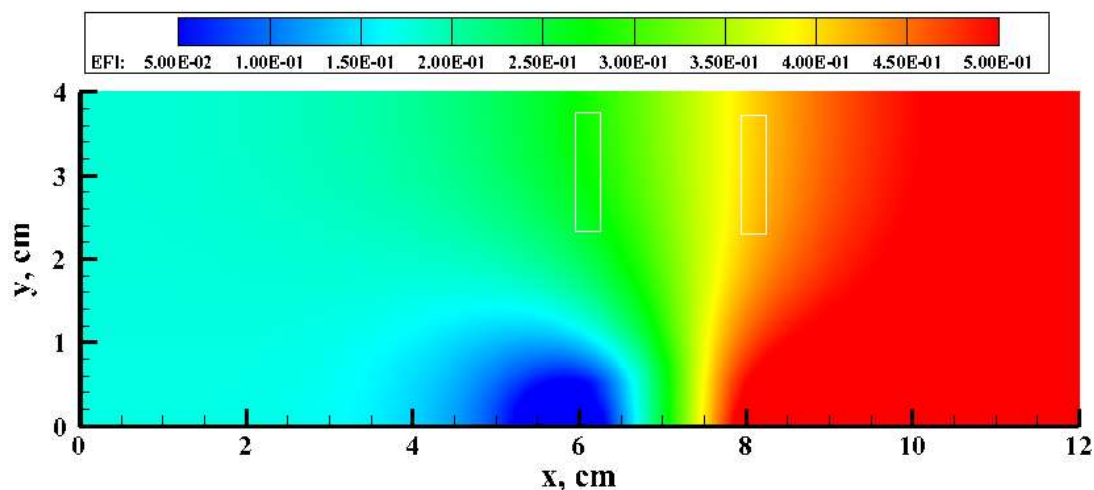
а) концентрация заряженных частиц, 10^9 см^{-3} ;
 б) электрический потенциал, φ/ε ;
 в) плотность электрического тока, $\text{A}/\text{см}^2$;
 г) распределение концентраций заряженных частиц (10^9 см^{-3}) и напряженности электрического поля E_y ($\text{В}/\text{см}$) вдоль поверхности;
 д) распределение коэффициентов C_p и C_τ вдоль поверхности;
 е) распределение критериев St и St_τ вдоль поверхности;
 ж) распределение компонент магнитной силы вдоль поверхности, $\text{дин}/\text{см}^2$

$p=0.6$ Torr, $M=5$, $E=150$ V, $R_o=12$ kOhm, $B_z=+0.3$ T



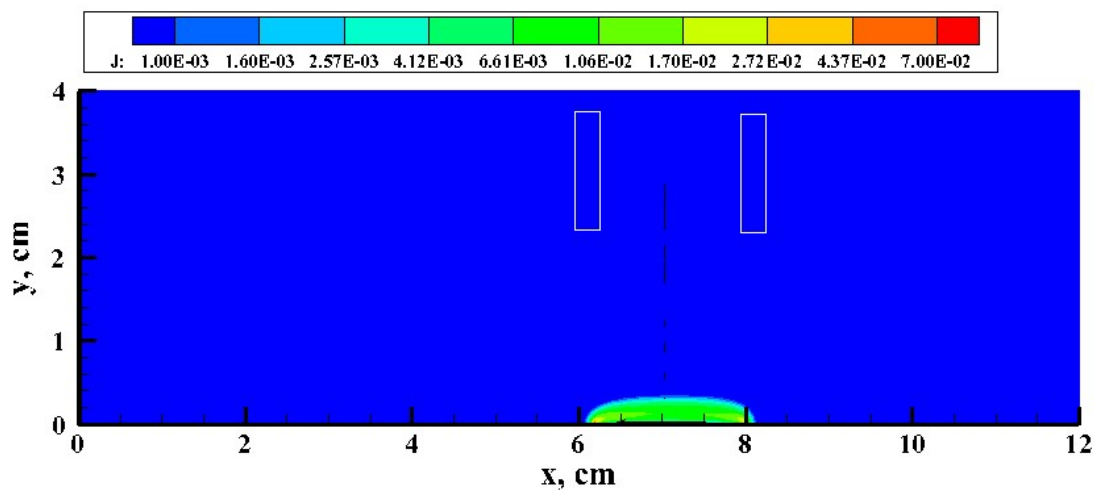
a

$p=0.6$ Torr, $M=5$, $E=150$ V, $R_o=12$ kOhm, $B_z=+0.3$ T



b

$p=0.6$ Torr, $M=5$, $E=150$ V, $R_o=12$ kOhm, $B_z=+0.3$ T



c

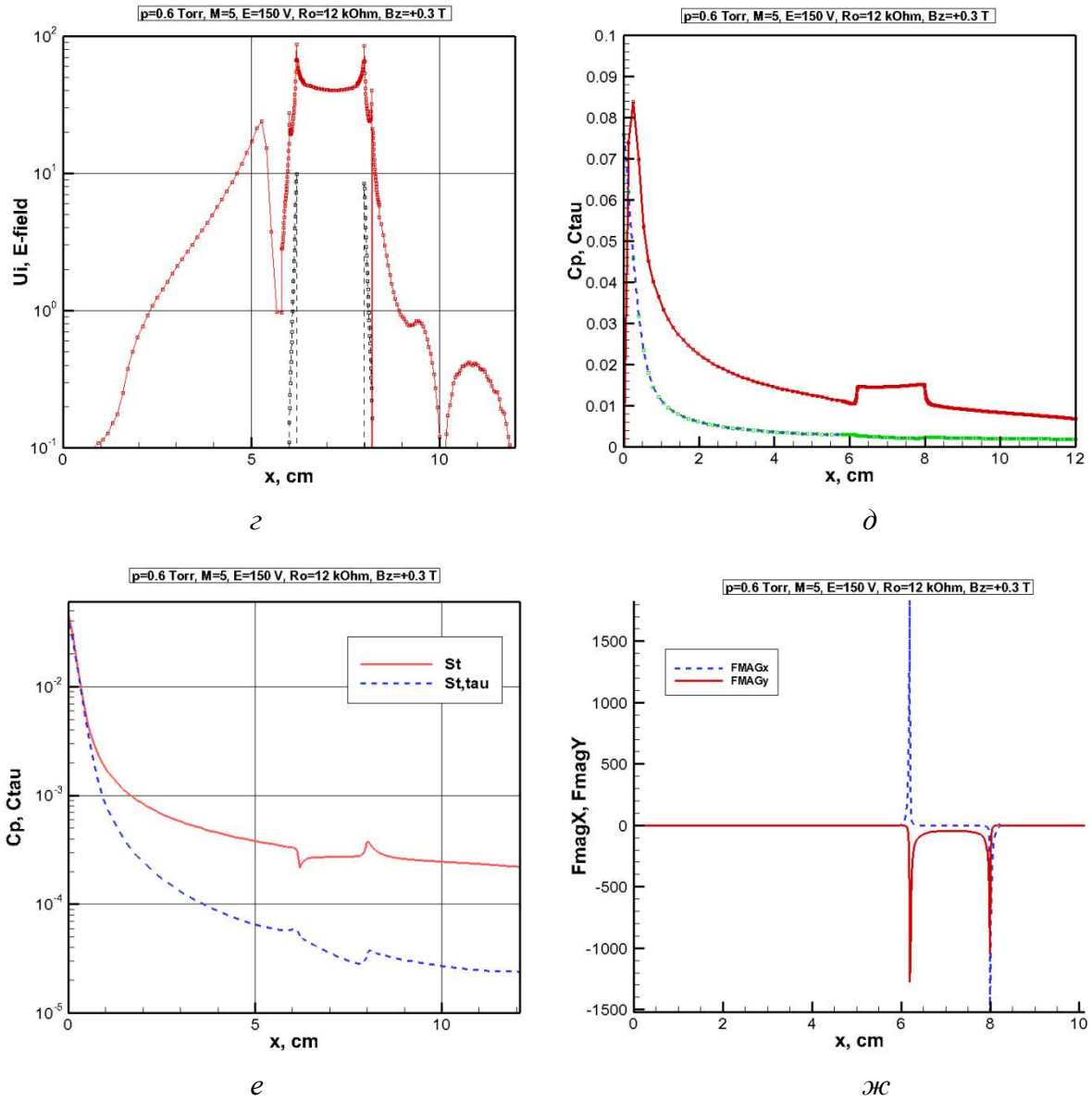
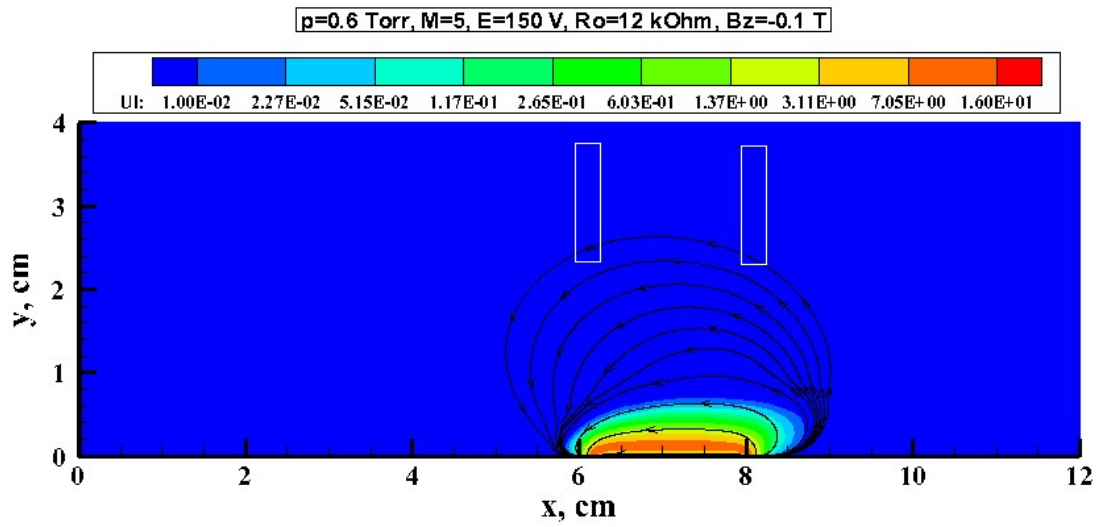
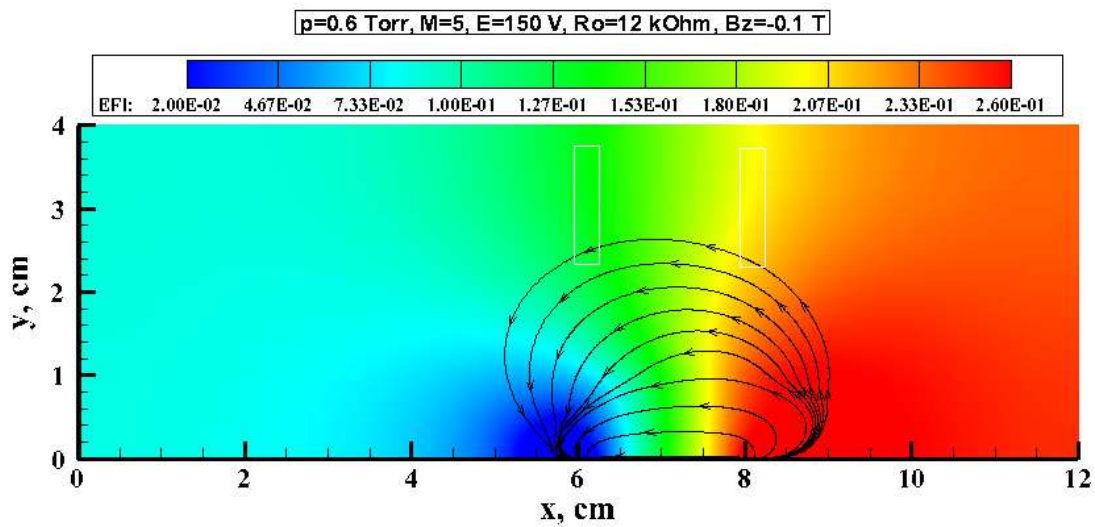


Рис. 3. Аномальный тлеющий разряд между двумя плоскими электродами, расположенными на поверхности обтекаемой пластины при исходных данных: $p_{\infty} = 0.784 \times 10^3$ эрг/см³ ($p_{\infty} = 0.6$ Тор), $\rho_{\infty} = 0.636 \times 10^{-5}$ г/см³, $T_{\infty} = 41.5$ К, $V_{\infty} = 0.676 \times 10^5$ см/с ($M = 5$), $\varepsilon = 150$ В, $R_0 = 12$ кОм, $B_z = +0.3$ Тл

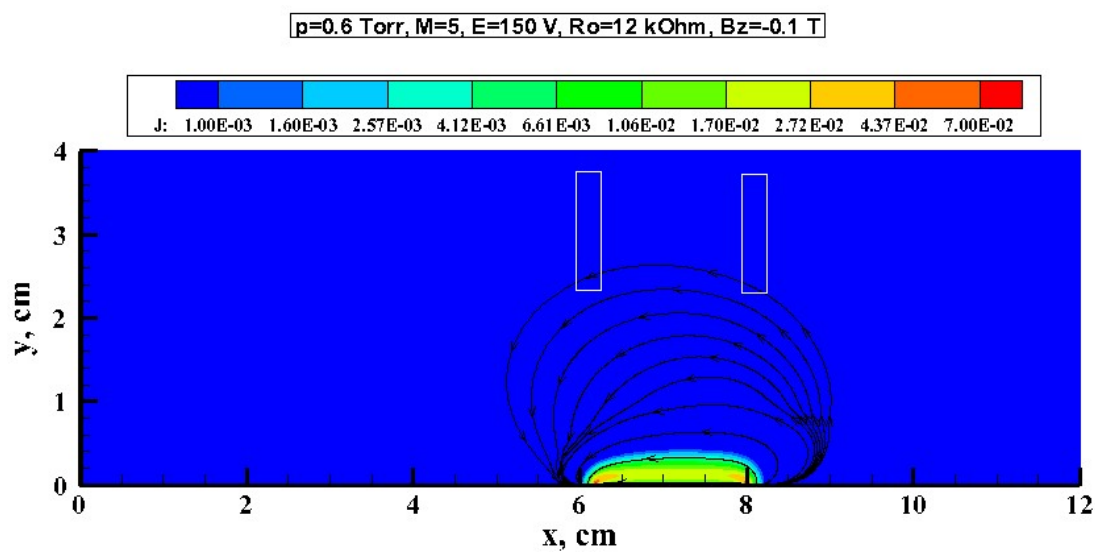
а) концентрация заряженных частиц, 10^9 см⁻³;
 б) электрический потенциал, φ/ε ;
 в) плотность электрического тока, А/см²;
 г) распределение концентраций заряженных частиц (10^9 см⁻³) и напряженности электрического поля E_y (В/см) вдоль поверхности;
 д) распределение коэффициентов C_p и C_t вдоль поверхности;
 е) распределение критериев St и St_{τ} вдоль поверхности;
 ж) распределение компонент магнитной силы вдоль поверхности, дин/см²



a



b



c

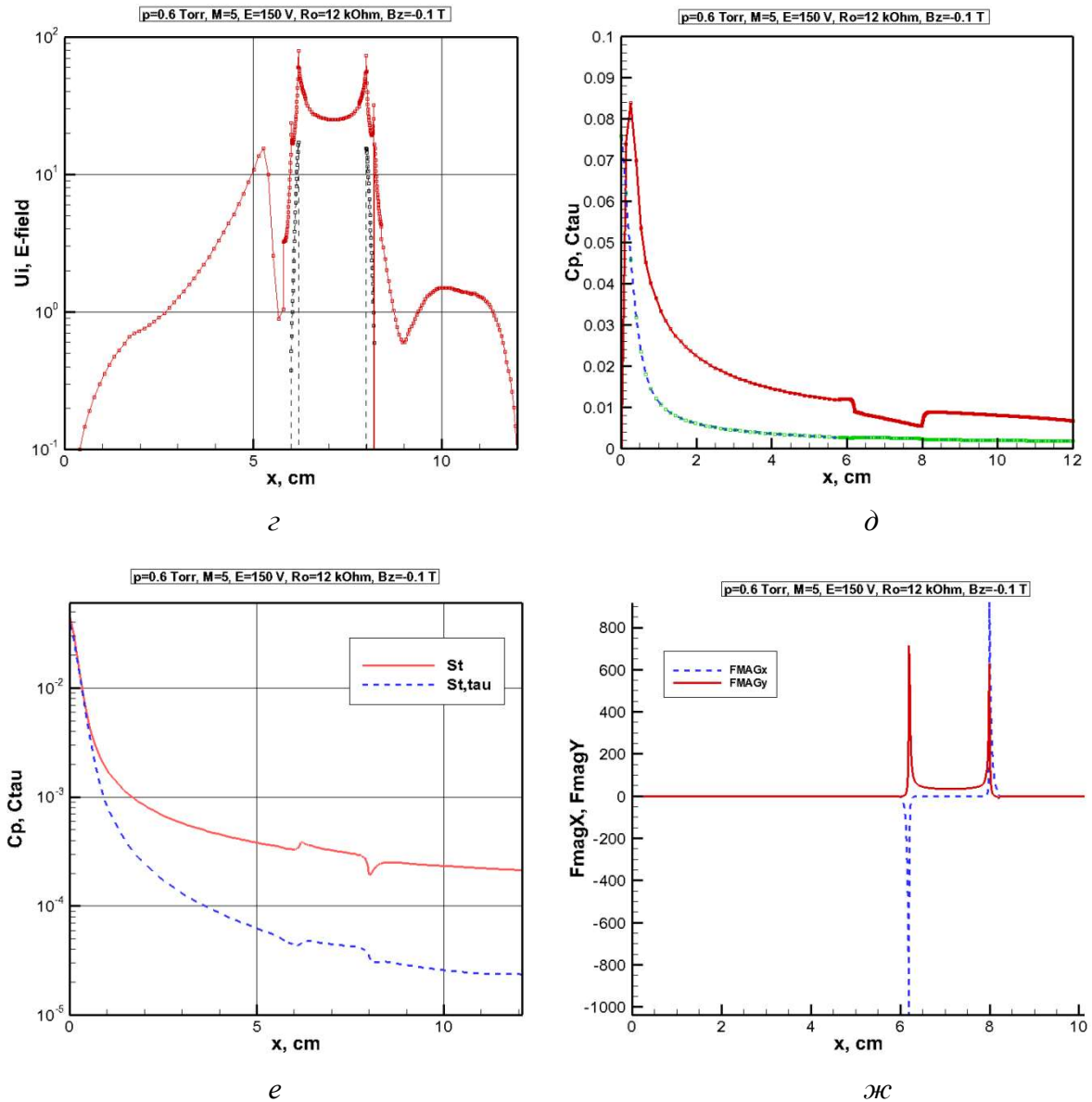
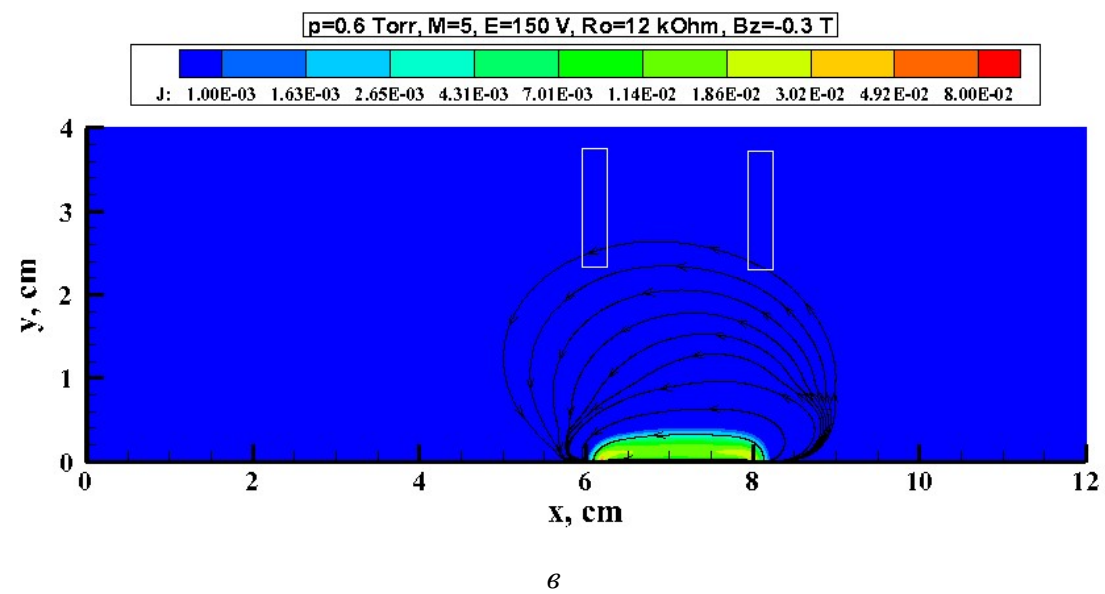
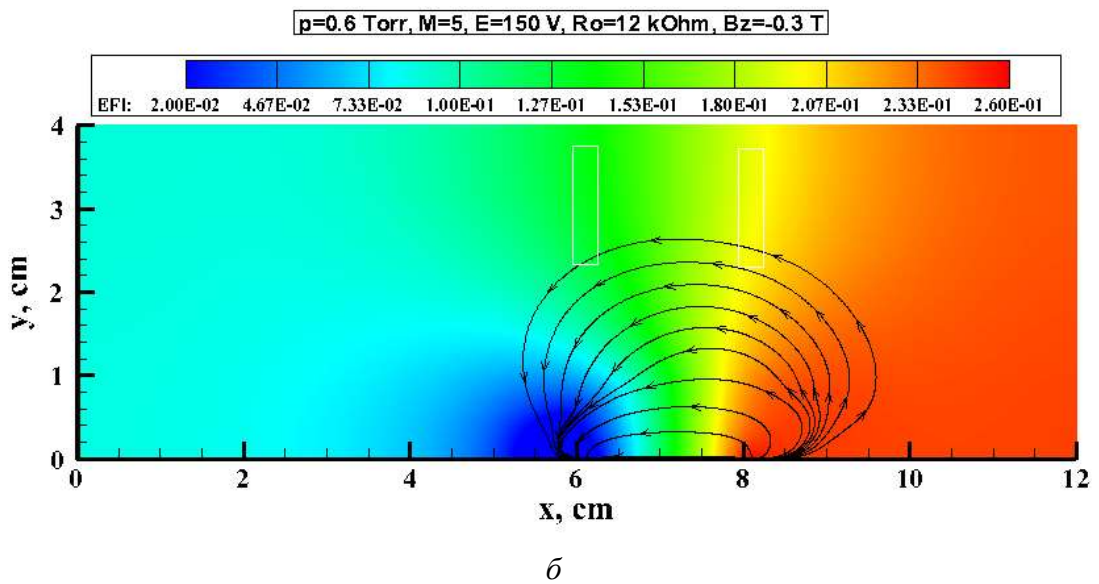
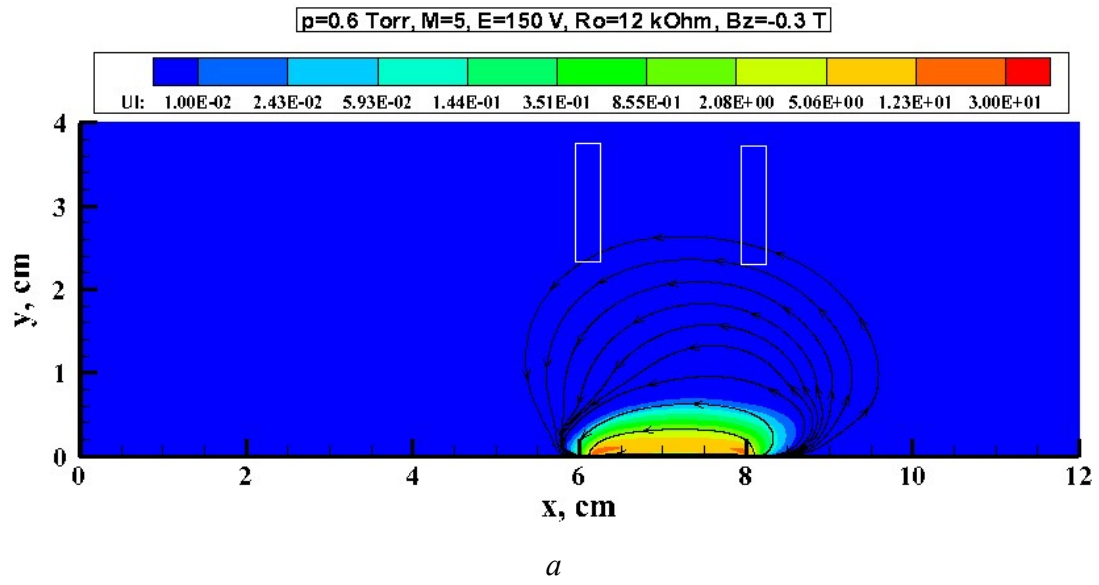


Рис. 4. Аномальный тлеющий разряд между двумя плоскими электродами, расположенными на поверхности обтекаемой пластины при исходных данных: $p_{\infty} = 0.784 \times 10^3$ эрг/см³ ($p_{\infty} = 0.6$ Тор), $\rho_{\infty} = 0.636 \times 10^{-5}$ г/см³, $T_{\infty} = 41.5$ К, $V_{\infty} = 0.676 \times 10^5$ см/с ($M = 5$), $\varepsilon = 150$ В, $R_0 = 12$ кОм, $B_z = -0.1$ Тл

- а) концентрация заряженных частиц, 10^9 см⁻³;
- б) электрический потенциал, φ/ε ;
- в) плотность электрического тока, А/см²;
- г) распределение концентраций заряженных частиц (10^9 см⁻³) и напряженности электрического поля E_y (В/см) вдоль поверхности;
- д) распределение коэффициентов C_p и C_{τ} вдоль поверхности;
- е) распределение критериев St и St_{τ} вдоль поверхности;
- ж) распределение компонент магнитной силы вдоль поверхности, дин/см²



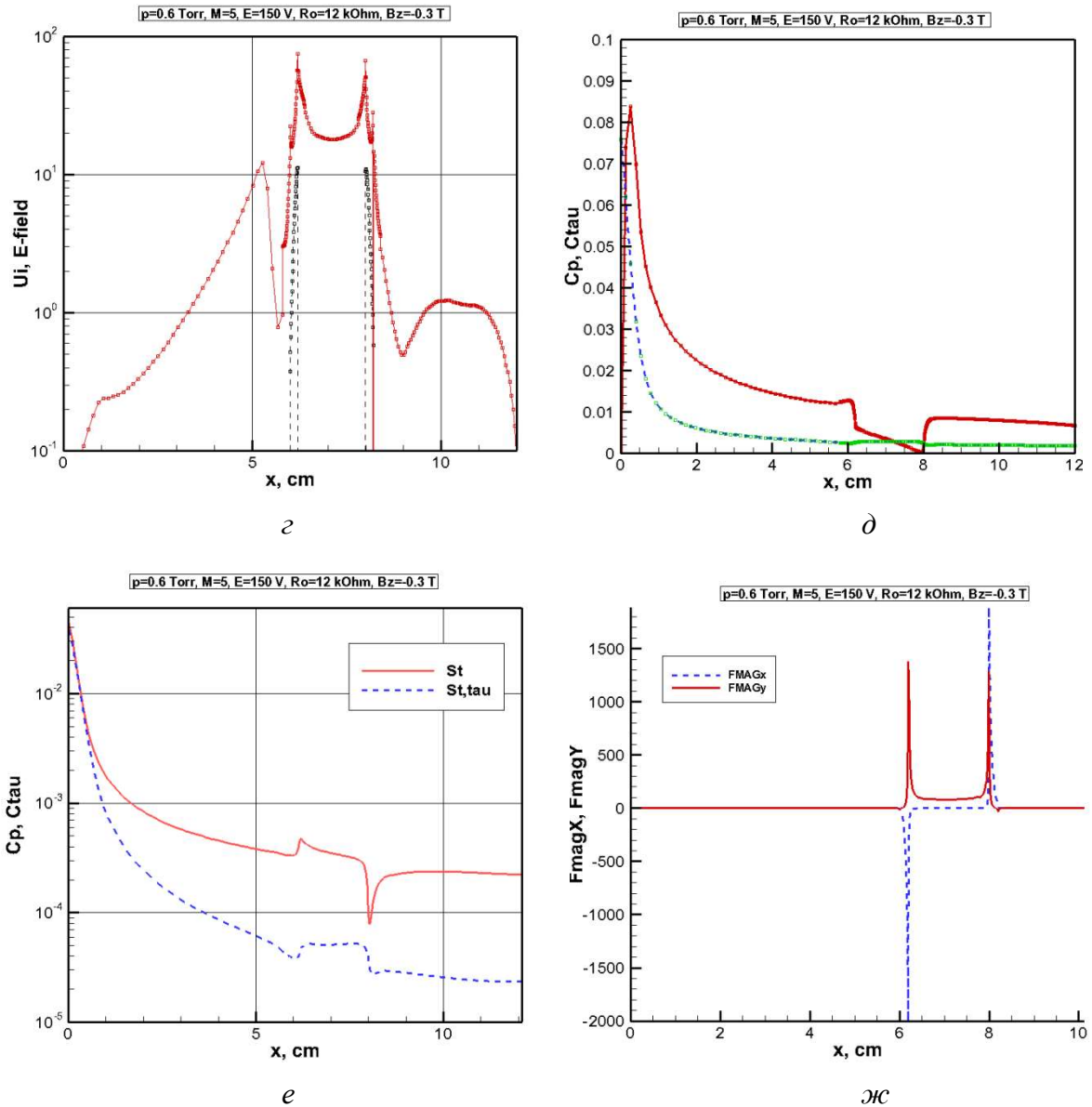
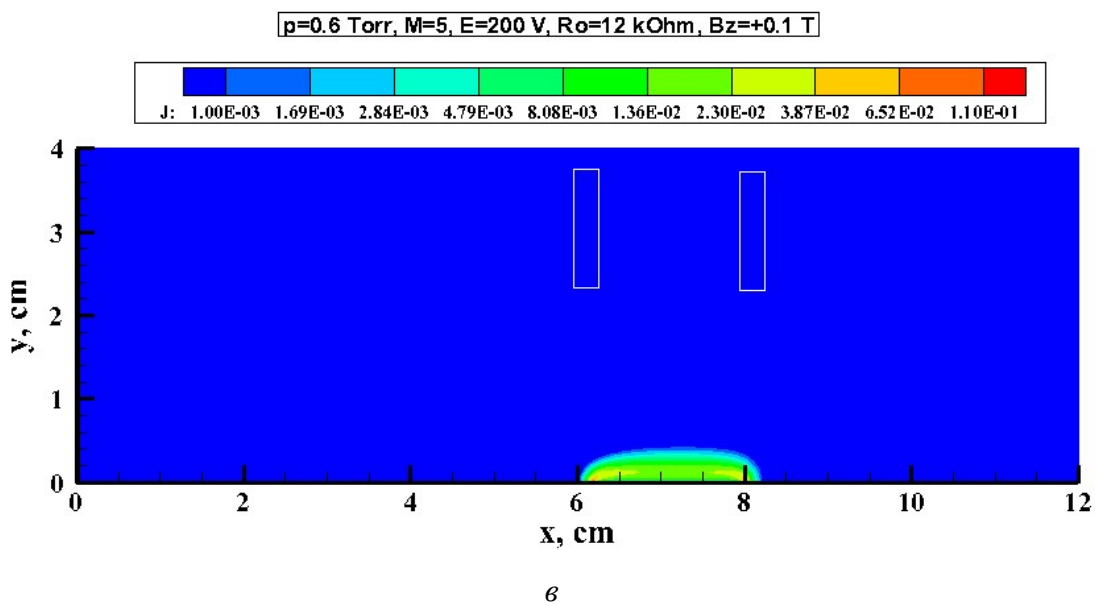
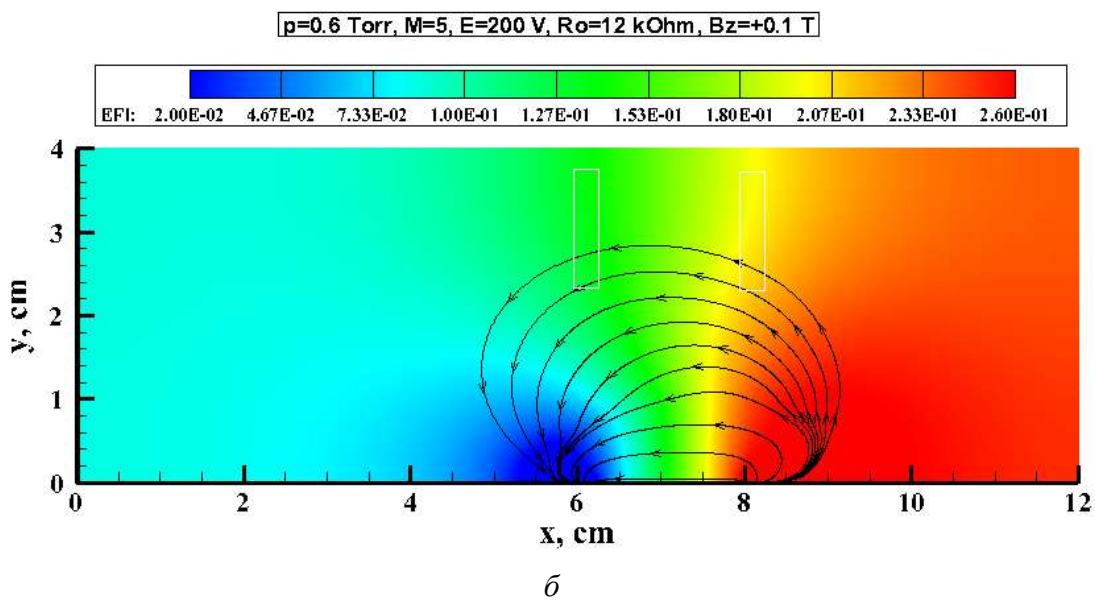
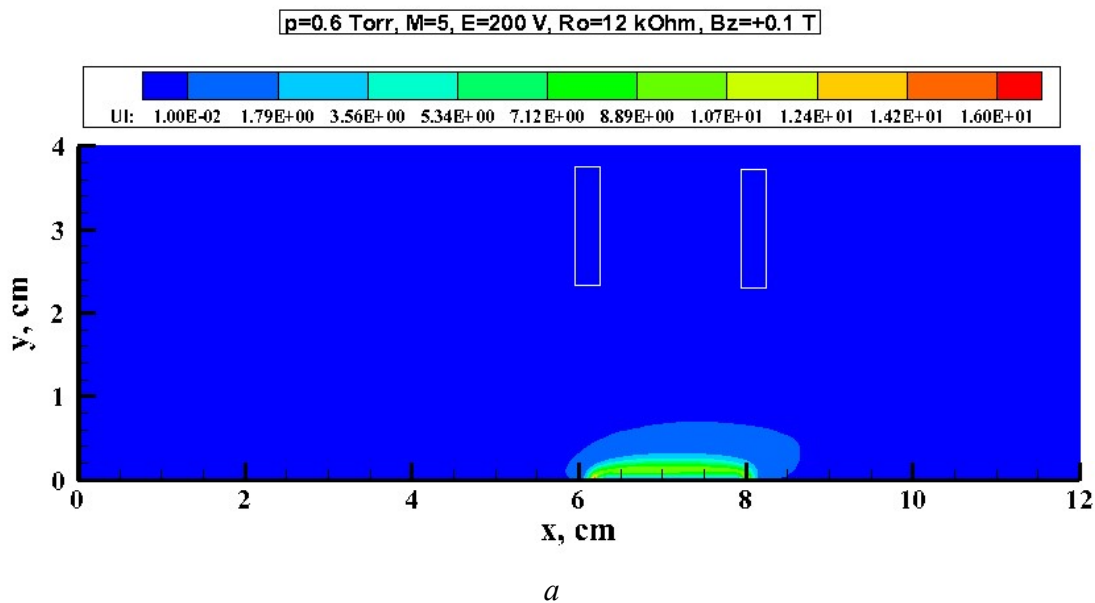


Рис. 5. Аномальный тлеющий разряд между двумя плоскими электродами, расположенными на поверхности обтекаемой пластины при исходных данных: $p_{\infty} = 0.784 \times 10^3$ эрг/см³ ($p_{\infty} = 0.6$ Тор), $\rho_{\infty} = 0.636 \times 10^{-5}$ г/см³, $T_{\infty} = 41.5$ К, $V_{\infty} = 0.676 \times 10^5$ см/с ($M = 5$), $\varepsilon = 150$ В, $R_0 = 12$ кОм, $B_z = -0.3$ Тл

- а) концентрация заряженных частиц, 10^9 см⁻³;
- б) электрический потенциал, φ/ε ;
- в) плотность электрического тока, А/см²;
- г) распределение концентраций заряженных частиц (10^9 см⁻³) и напряженности электрического поля E_y (В/см) вдоль поверхности;
- д) распределение коэффициентов C_p и C_{τ} вдоль поверхности;
- е) распределение критериев St и St_{τ} вдоль поверхности;
- ж) распределение компонент магнитной силы вдоль поверхности, дин/см²



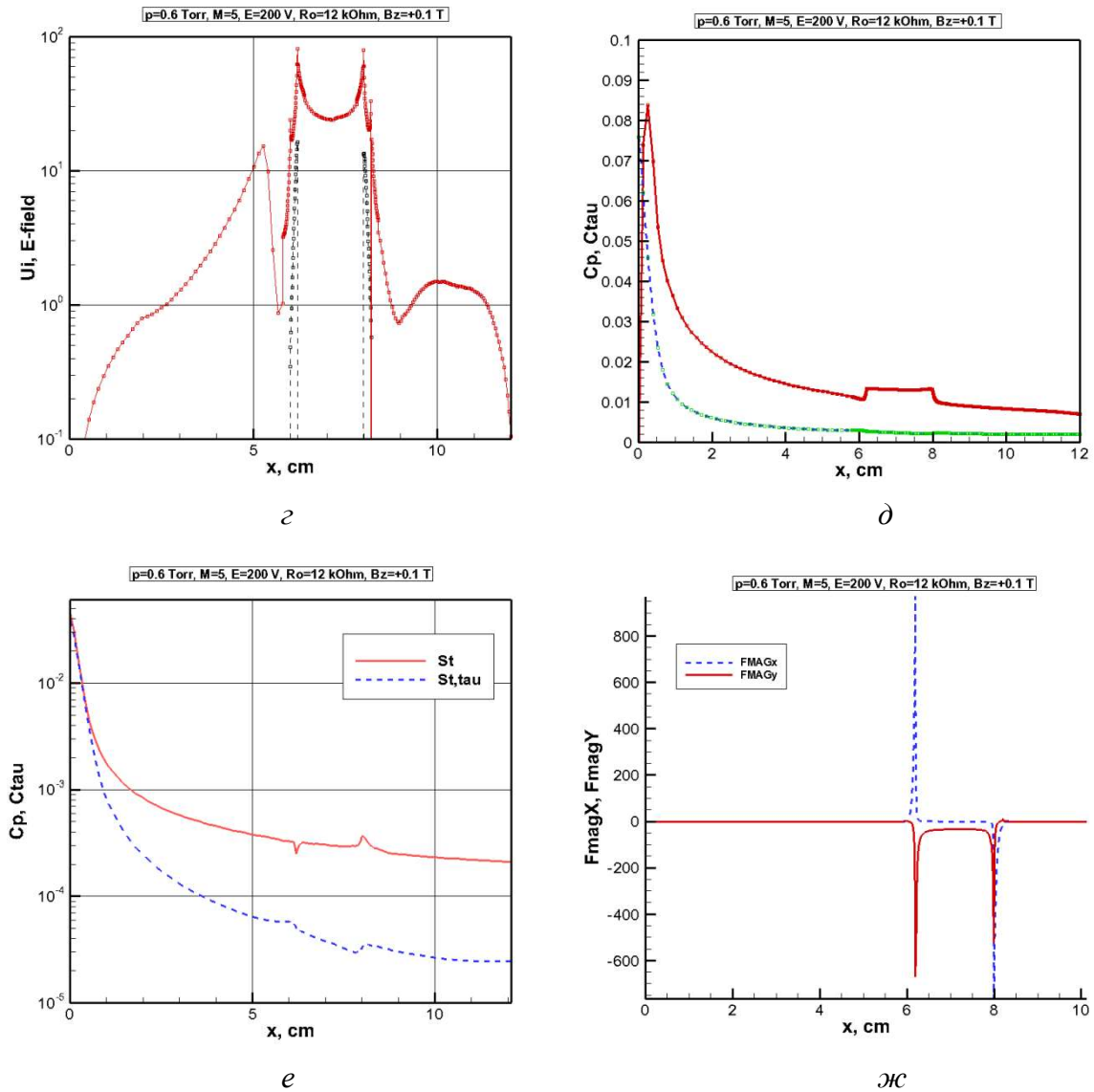
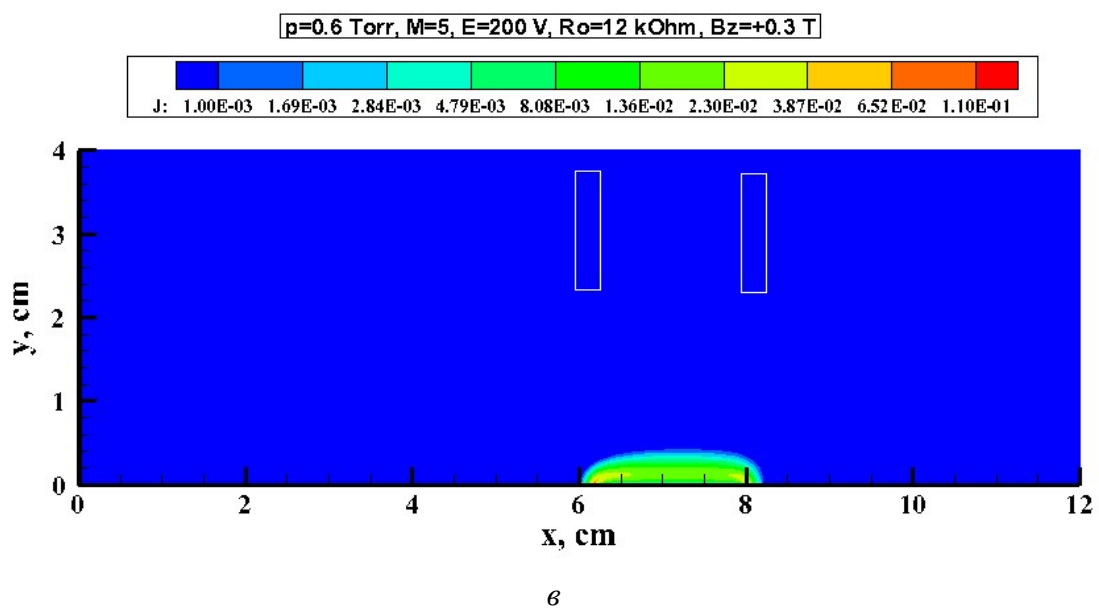
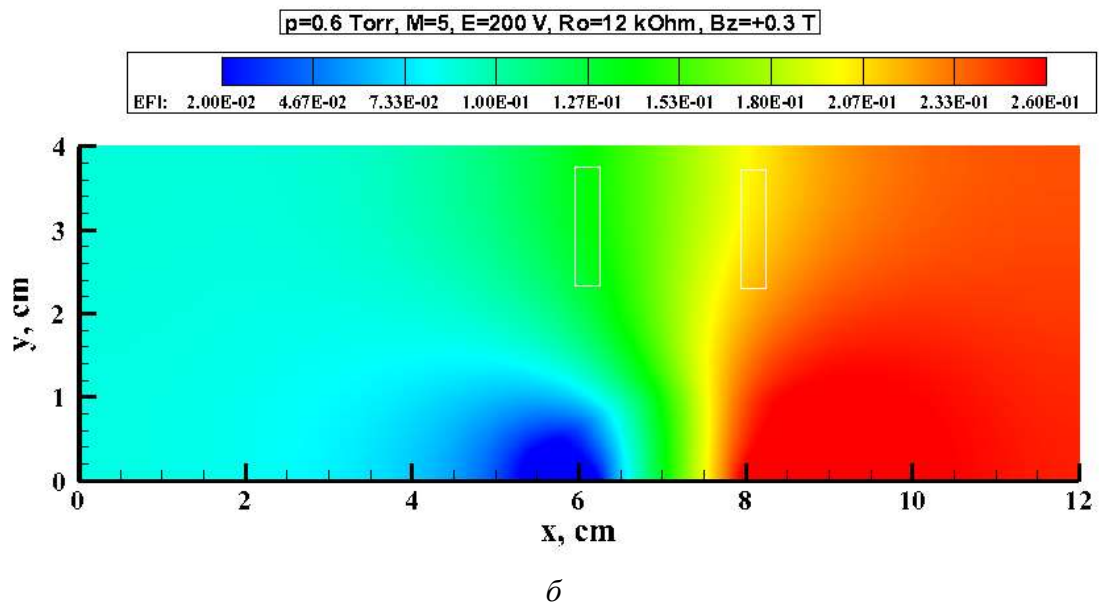
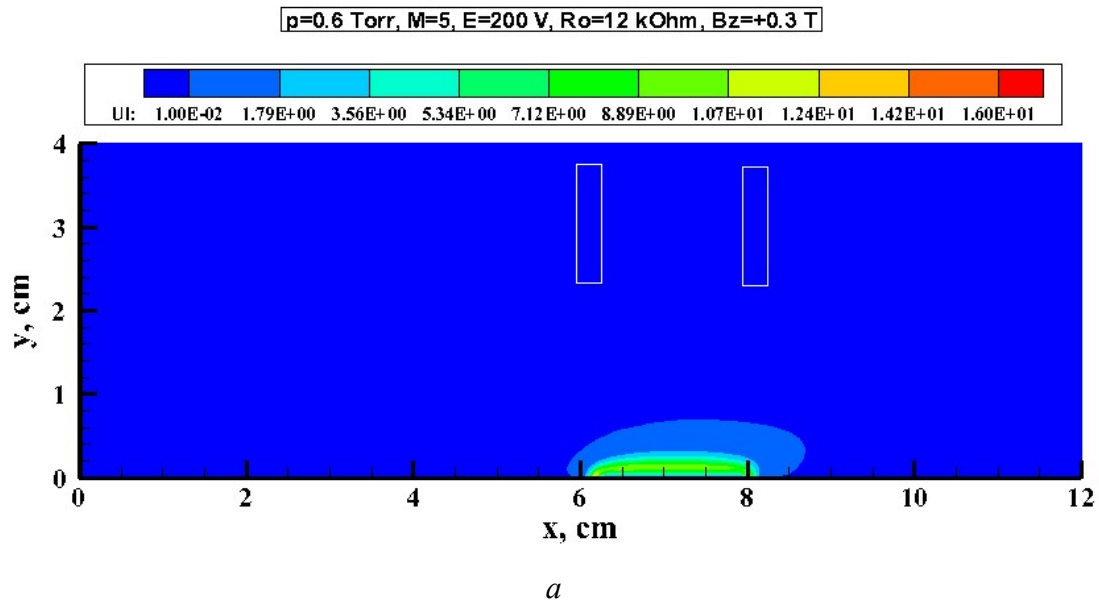


Рис. 6. Аномальный тлеющий разряд между двумя плоскими электродами, расположенными на поверхности обтекаемой пластины при исходных данных: $p_{\infty} = 0.784 \times 10^3$ эрг/см³ ($p_{\infty} = 0.6$ Тор), $\rho_{\infty} = 0.636 \times 10^{-5}$ г/см³, $T_{\infty} = 41.5$ К, $V_{\infty} = 0.676 \times 10^5$ см/с ($M = 5$), $\varepsilon = 200$ В, $R_0 = 12$ кОм, $B_z = +0.1$ Тл

- а) концентрация заряженных частиц, 10^9 см⁻³;
- б) электрический потенциал, φ/ε ;
- в) плотность электрического тока, А/см²;
- г) распределение концентраций заряженных частиц (10^9 см⁻³) и напряженности электрического поля E_y (В/см) вдоль поверхности;
- д) распределение коэффициентов C_p и C_{τ} вдоль поверхности;
- е) распределение критериев St и St_{τ} вдоль поверхности;
- ж) распределение компонент магнитной силы вдоль поверхности, дин/см²



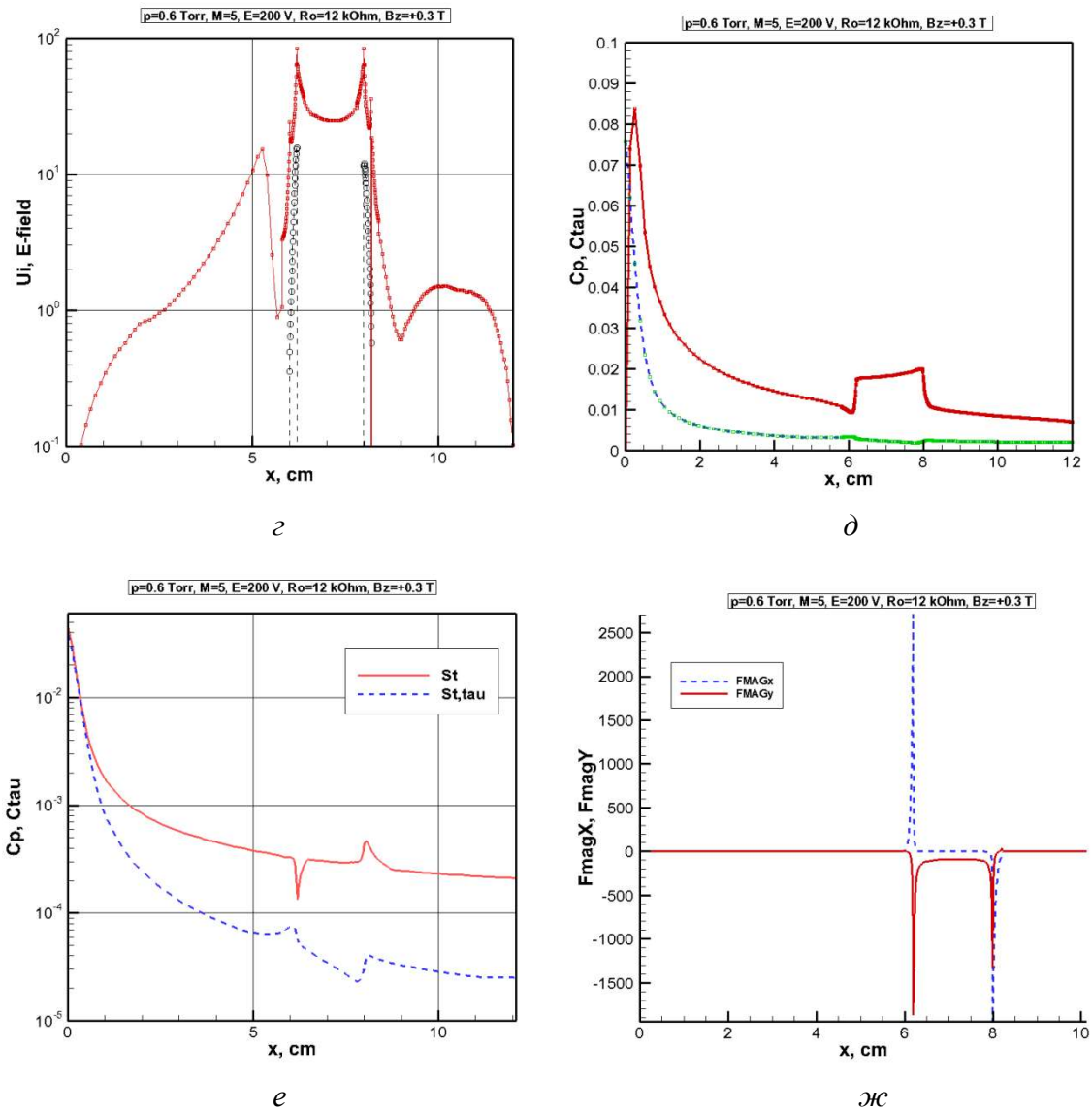
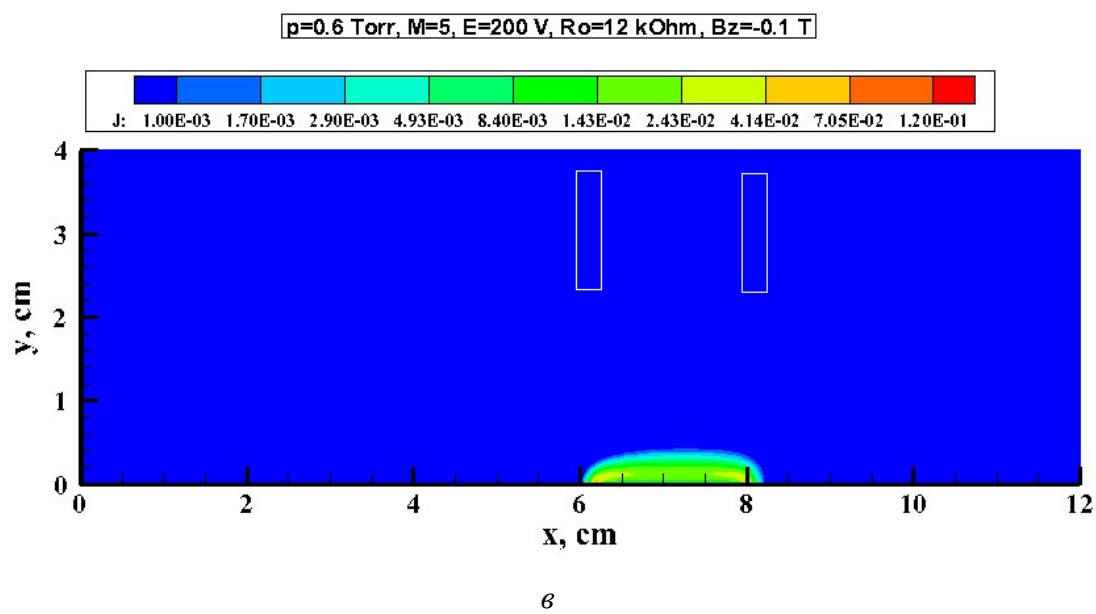
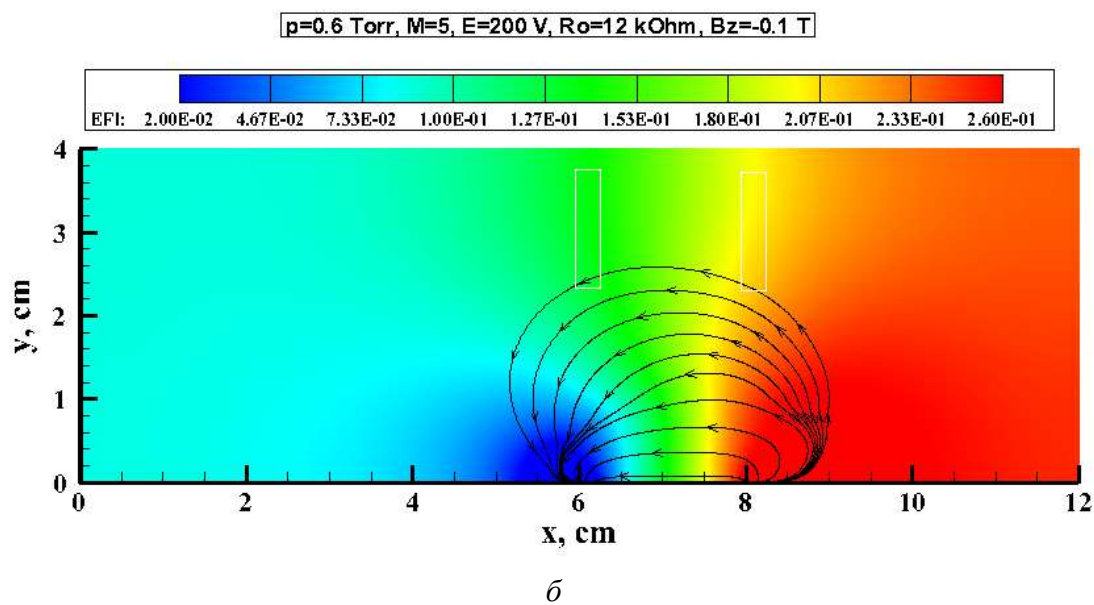
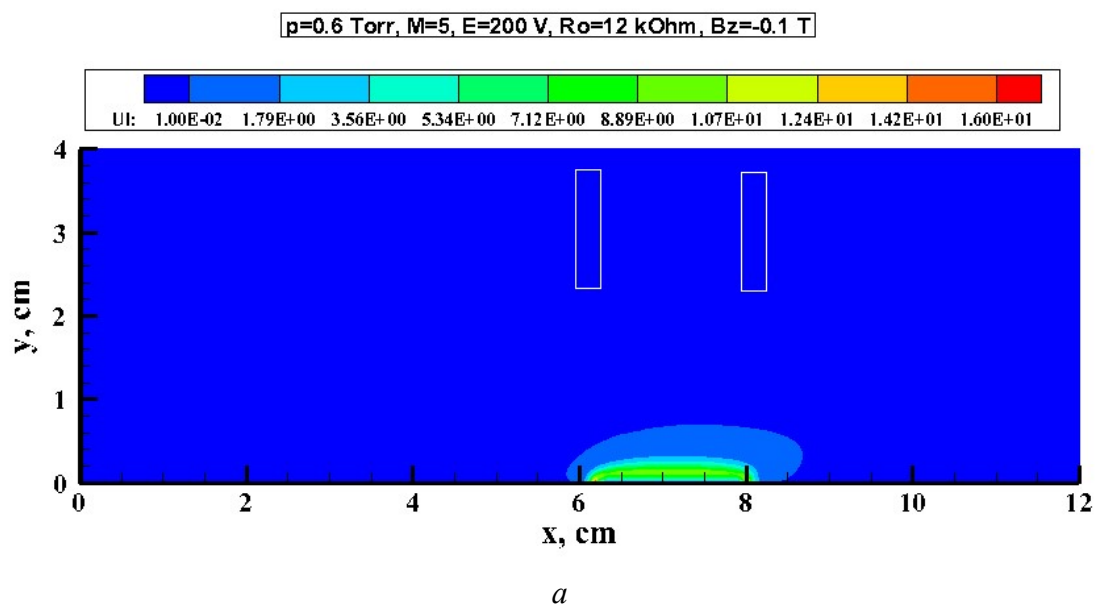


Рис. 7. Аномальный тлеющий разряд между двумя плоскими электродами, расположенными на поверхности обтекаемой пластины при исходных данных: $p_{\infty} = 0.784 \times 10^3$ эрг/см³ ($p_{\infty} = 0.6$ Тор), $\rho_{\infty} = 0.636 \times 10^{-5}$ г/см³, $T_{\infty} = 41.5$ К, $V_{\infty} = 0.676 \times 10^5$ см/с ($M = 5$), $\varepsilon = 200$ В, $R_0 = 12$ кОм, $B_z = +0.3$ Тл

- а) концентрация заряженных частиц, 10^9 см⁻³;
- б) электрический потенциал, φ/ε ;
- в) плотность электрического тока, А/см²;
- г) распределение концентраций заряженных частиц (10^9 см⁻³) и напряженности электрического поля E_y (В/см) вдоль поверхности;
- д) распределение коэффициентов C_p и C_t вдоль поверхности;
- е) распределение критериев St и St_{τ} вдоль поверхности;
- ж) распределение компонент магнитной силы вдоль поверхности, дин/см²



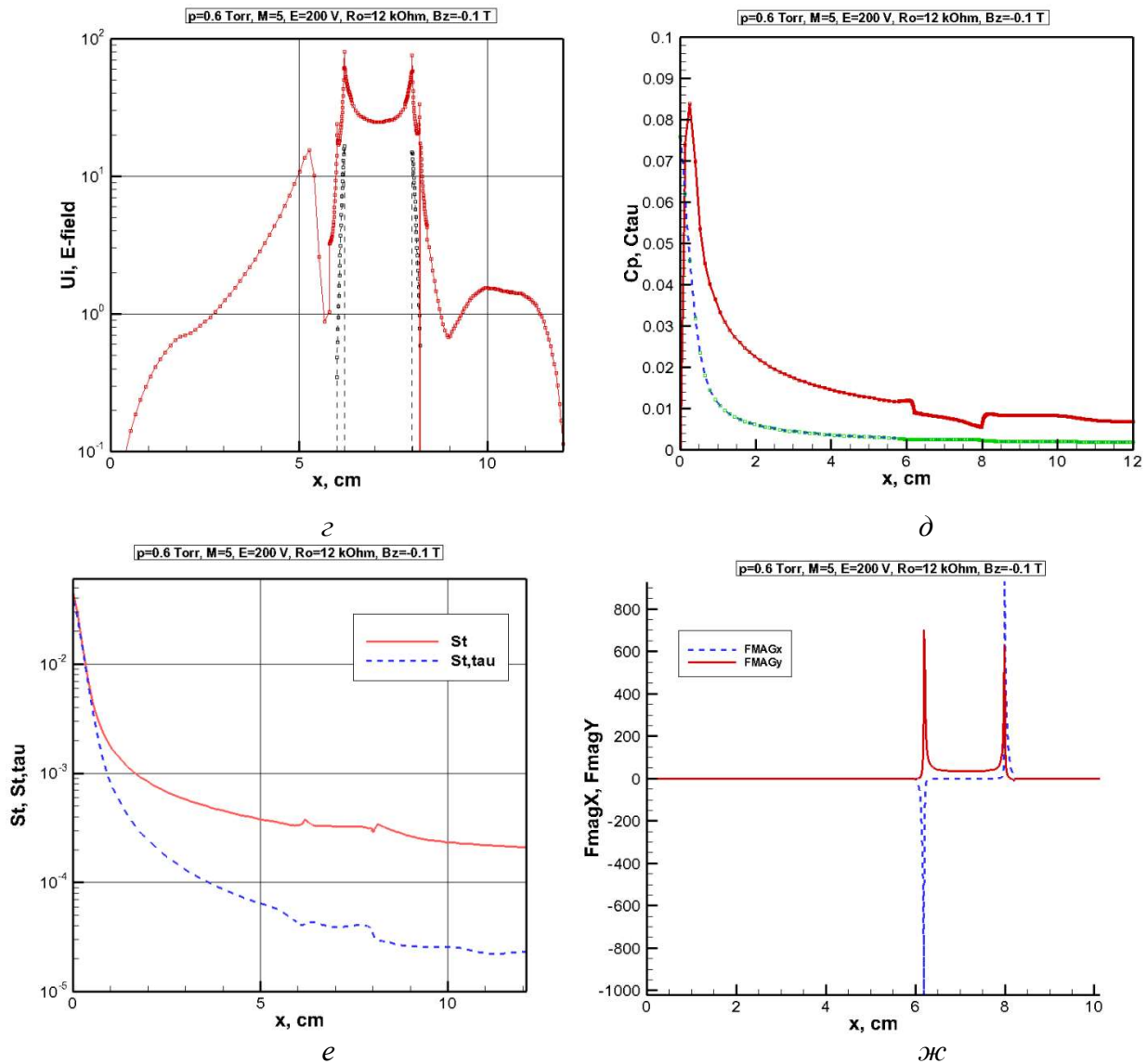
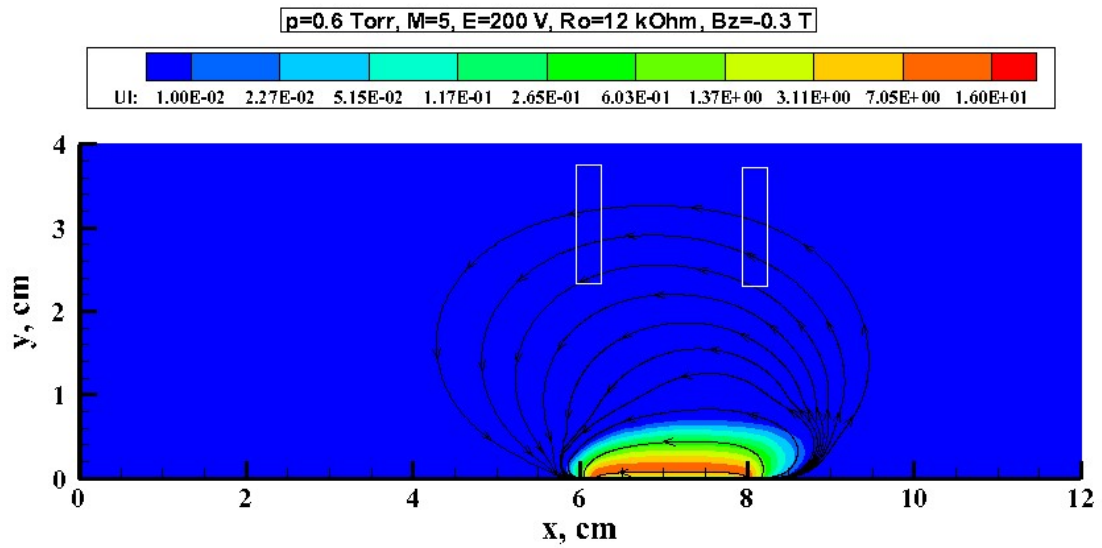
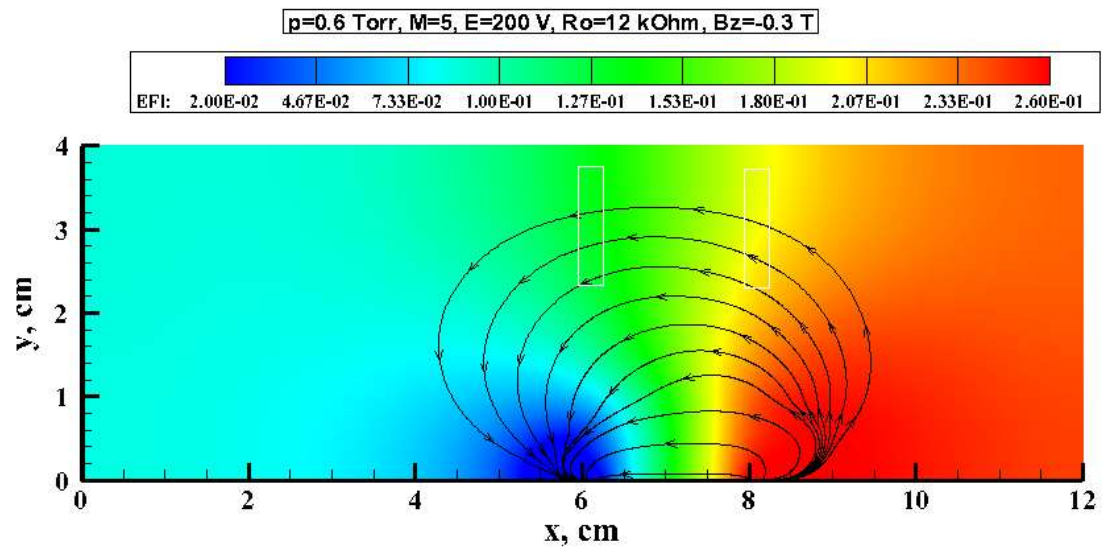


Рис. 8. Аномальный тлеющий разряд между двумя плоскими электродами, расположенными на поверхности обтекаемой пластины при исходных данных: $p_{\infty} = 0.784 \times 10^3$ эрг/см³ ($p_{\infty} = 0.6$ Тор), $\rho_{\infty} = 0.636 \times 10^{-5}$ г/см³, $T_{\infty} = 41.5$ К, $V_{\infty} = 0.676 \times 10^5$ см/с ($M = 5$), $\varepsilon = 200$ В, $R_0 = 12$ кОм, $B_z = -0.1$ Тл

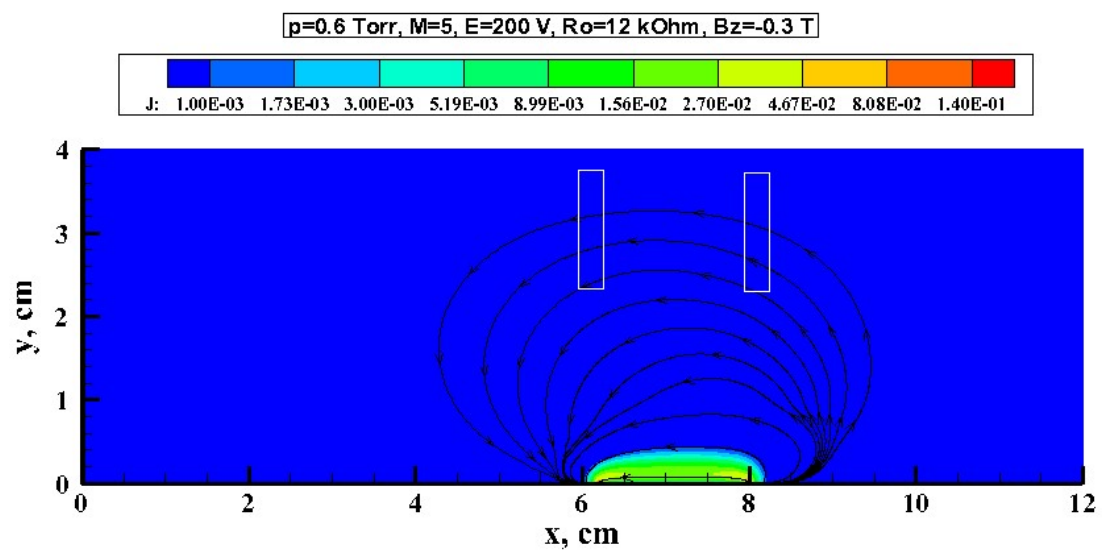
- а) концентрация заряженных частиц, 10^9 см⁻³;
- б) электрический потенциал, φ/ε ;
- в) плотность электрического тока, А/см²;
- г) распределение концентраций заряженных частиц (10^9 см⁻³) и напряженности электрического поля E_y (В/см) вдоль поверхности;
- д) распределение коэффициентов C_p и C_t вдоль поверхности;
- е) распределение критериев St и St_{τ} вдоль поверхности;
- ж) распределение компонент магнитной силы вдоль поверхности, дин/см²



a



b



c

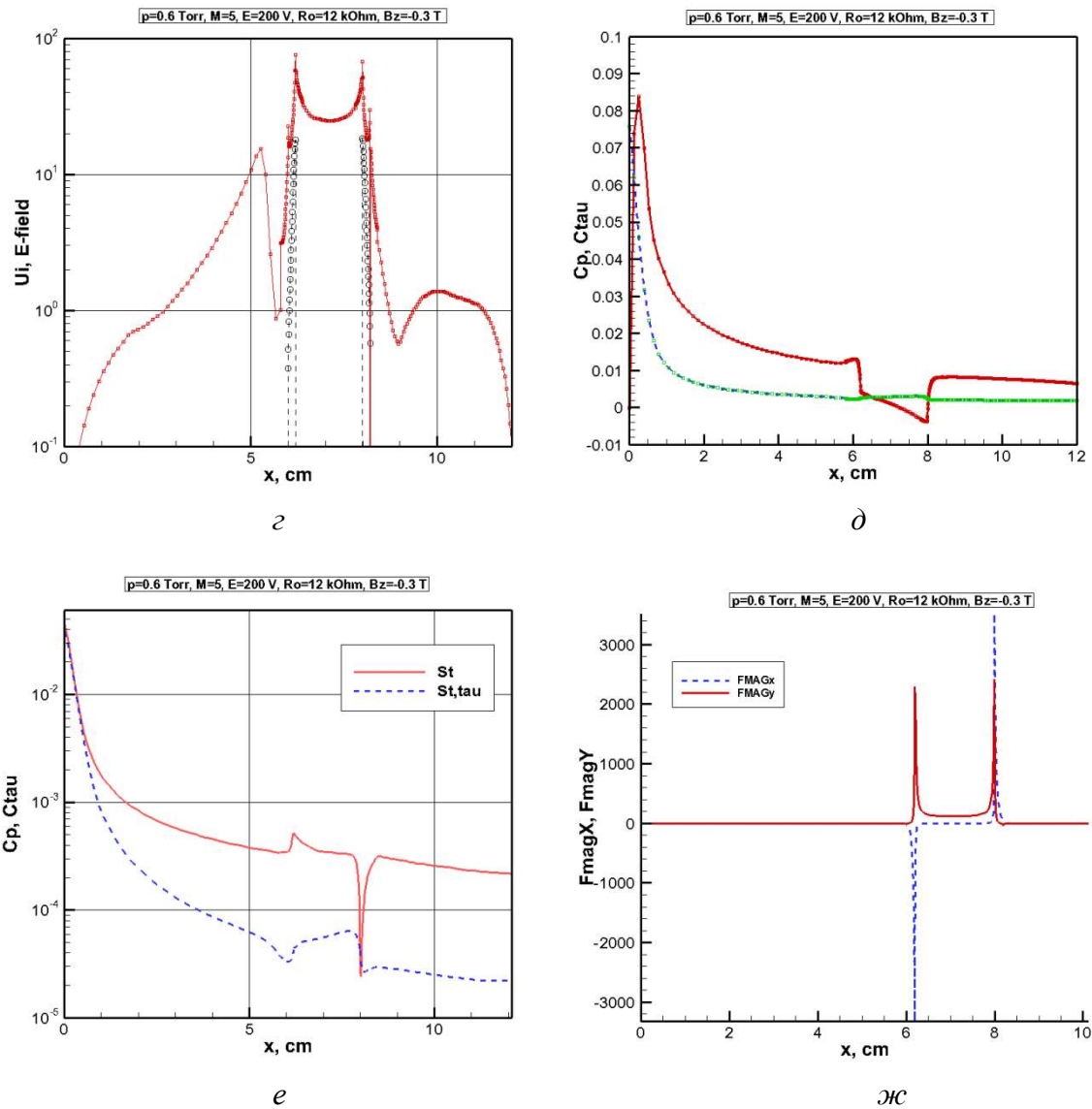
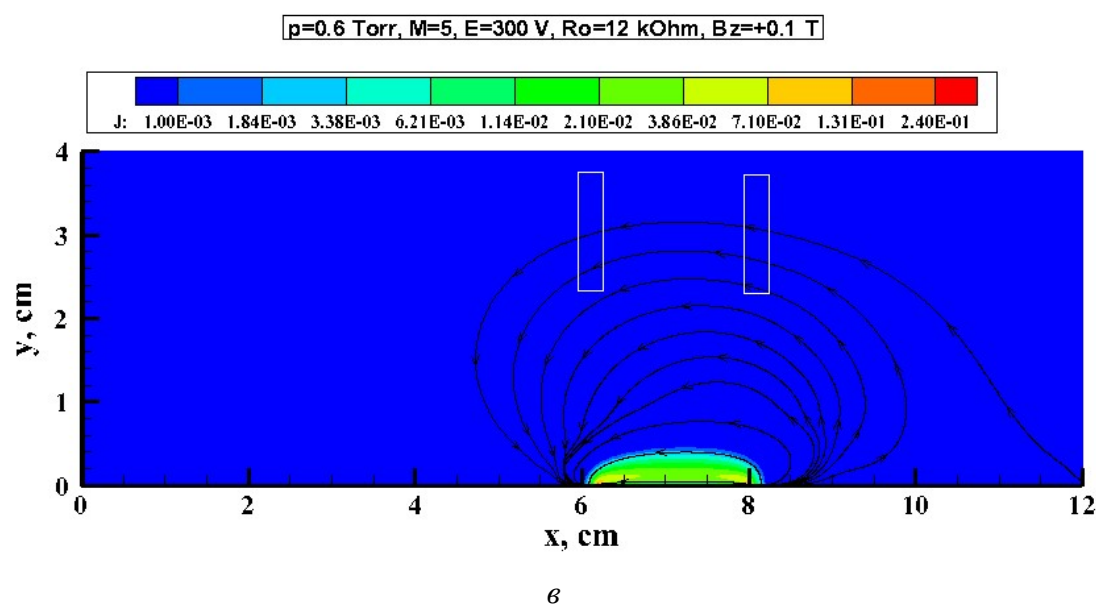
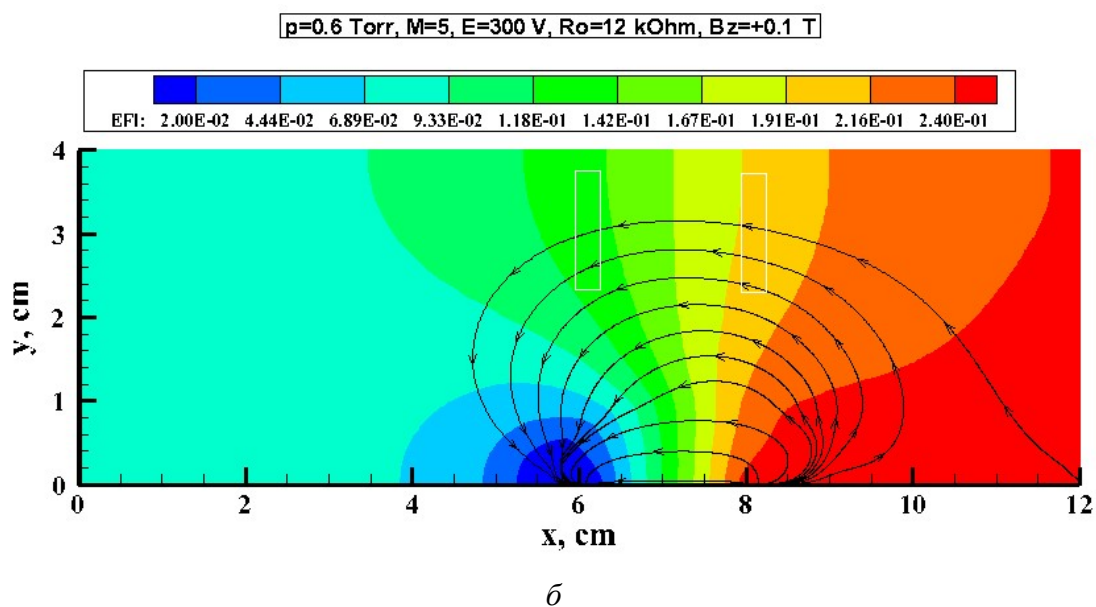
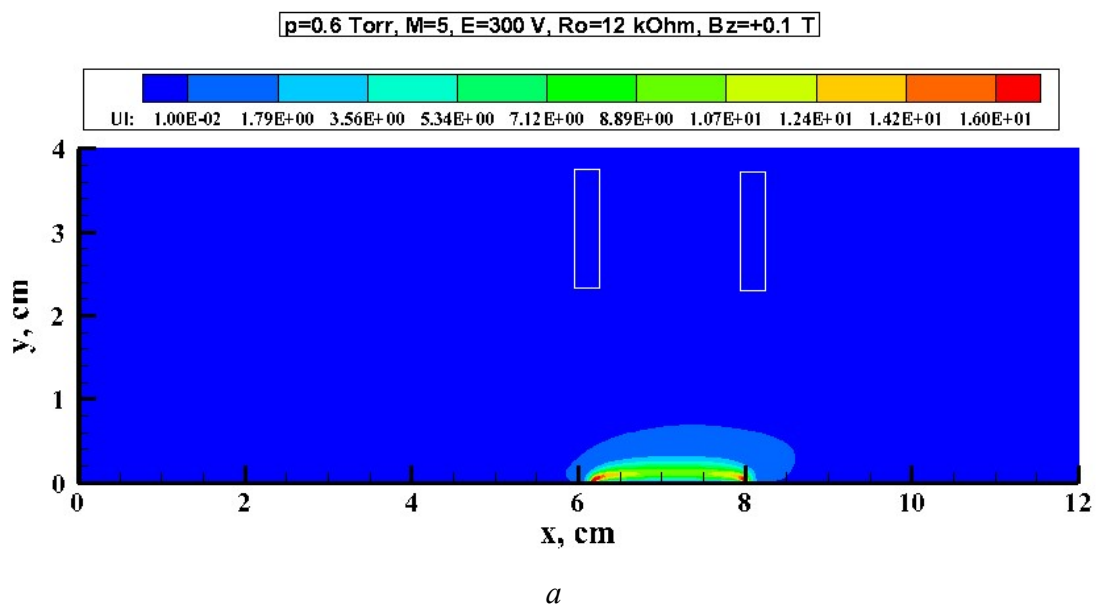


Рис. 9. Аномальный тлеющий разряд между двумя плоскими электродами, расположенными на поверхности обтекаемой пластины при исходных данных: $p_{\infty} = 0.784 \times 10^3$ эрг/см³ ($p_{\infty} = 0.6$ Тор), $\rho_{\infty} = 0.636 \times 10^{-5}$ г/см³, $T_{\infty} = 41.5$ К, $V_{\infty} = 0.676 \times 10^5$ см/с ($M = 5$), $\varepsilon = 200$ В, $R_0 = 12$ кОм, $B_z = -0.3$ Тл

- а) концентрация заряженных частиц, 10^9 см⁻³;
- б) электрический потенциал, φ/ε ;
- в) плотность электрического тока, А/см²;
- г) распределение концентраций заряженных частиц (10^9 см⁻³) и напряженности электрического поля E_y (В/см) вдоль поверхности;
- д) распределение коэффициентов C_p и C_t вдоль поверхности;
- е) распределение критериев St и St_{τ} вдоль поверхности;
- ж) распределение компонент магнитной силы вдоль поверхности, дин/см²



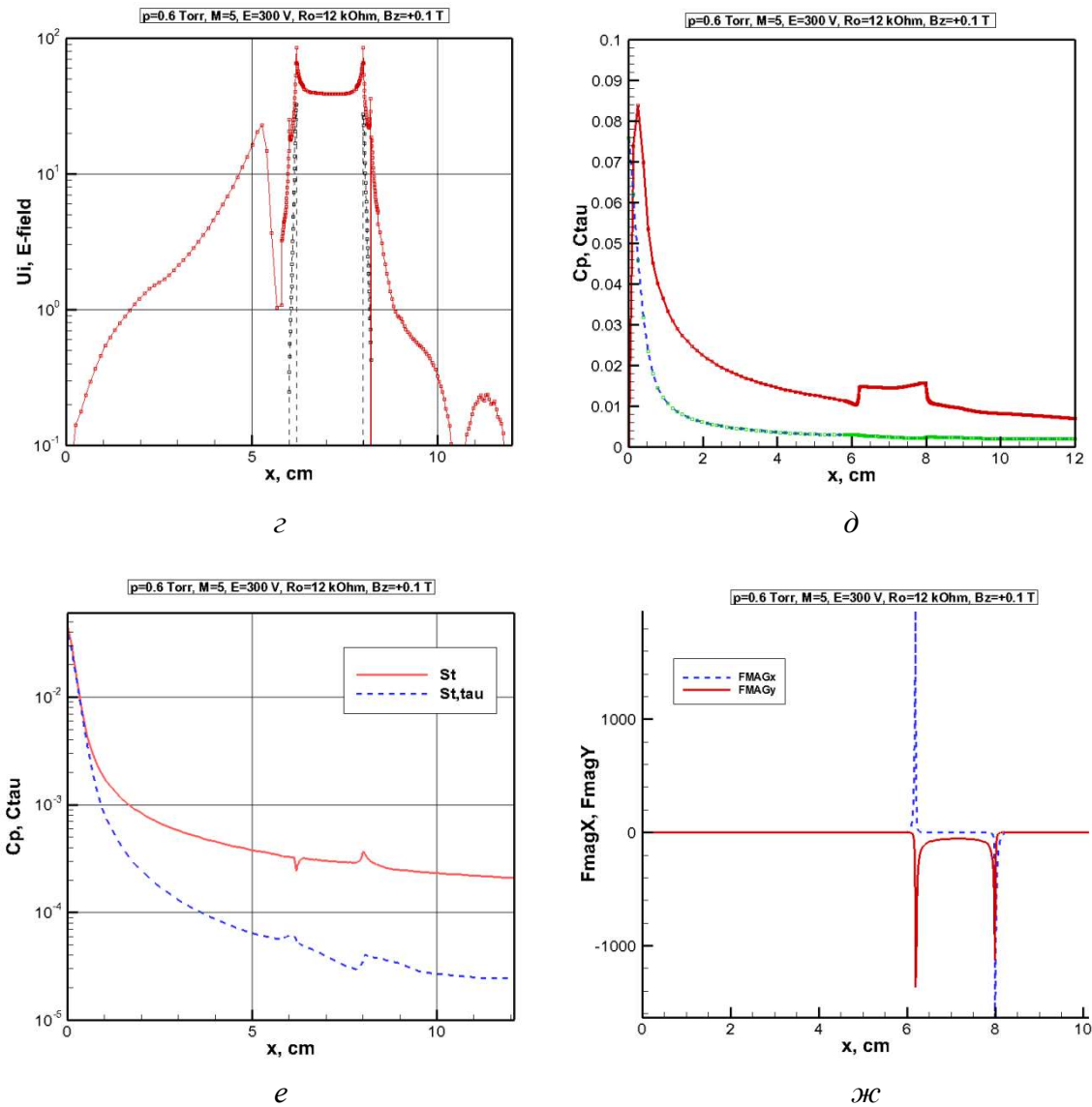
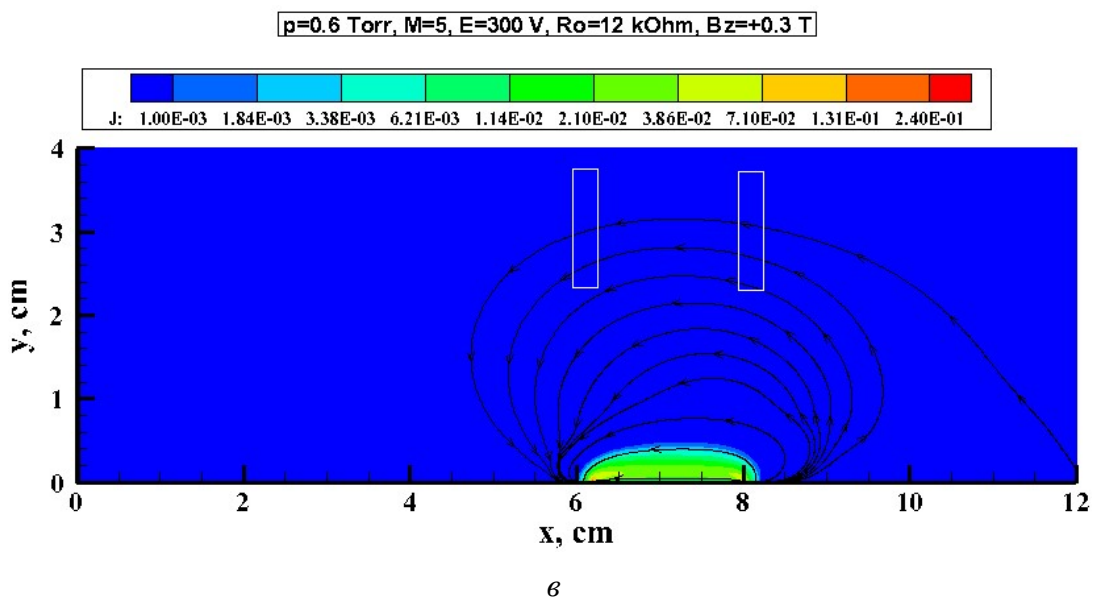
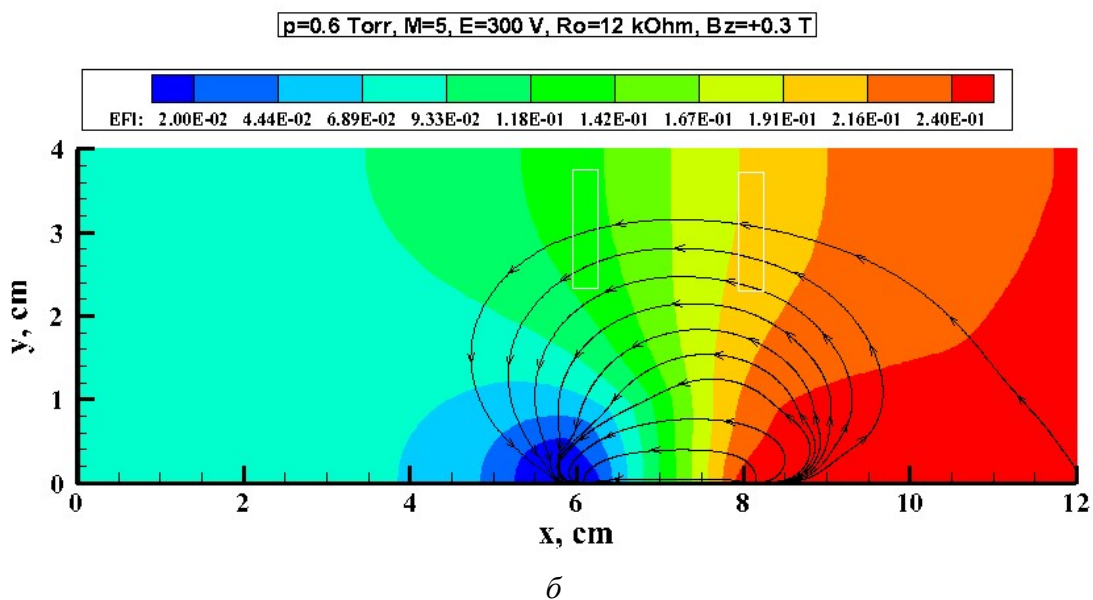
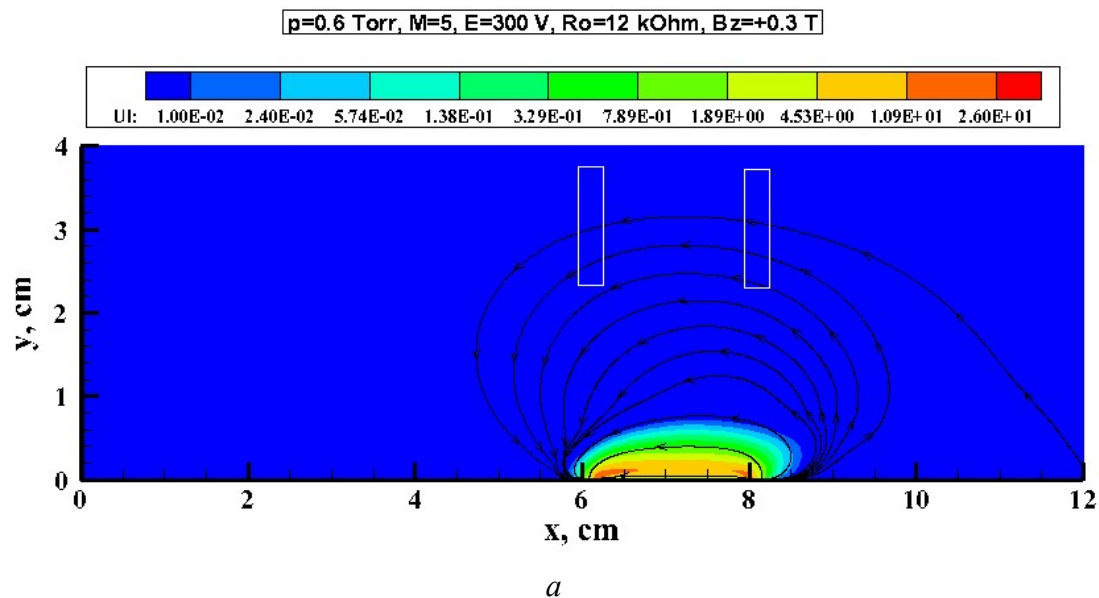


Рис. 10. Аномальный тлеющий разряд между двумя плоскими электродами, расположенными на поверхности обтекаемой пластины при исходных данных: $p_\infty = 0.784 \times 10^3$ эрг/см³ ($p_\infty = 0.6$ Тор), $\rho_\infty = 0.636 \times 10^{-5}$ г/см³, $T_\infty = 41.5$ К, $V_\infty = 0.676 \times 10^5$ см/с ($M = 5$), $\epsilon = 300$ В, $R_0 = 12$ кОм, $B_z = +0.1$ Тл

- а) концентрация заряженных частиц, 10^9 см^{-3} ;
- б) электрический потенциал, φ/ϵ ;
- в) плотность электрического тока, А/см^2 ;
- г) распределение концентраций заряженных частиц (10^9 см^{-3}) и напряженности электрического поля E_y (В/см) вдоль поверхности;
- д) распределение коэффициентов C_p и C_τ вдоль поверхности;
- е) распределение критериев St и St_τ вдоль поверхности;
- ж) распределение компонент магнитной силы вдоль поверхности, дин/см^2



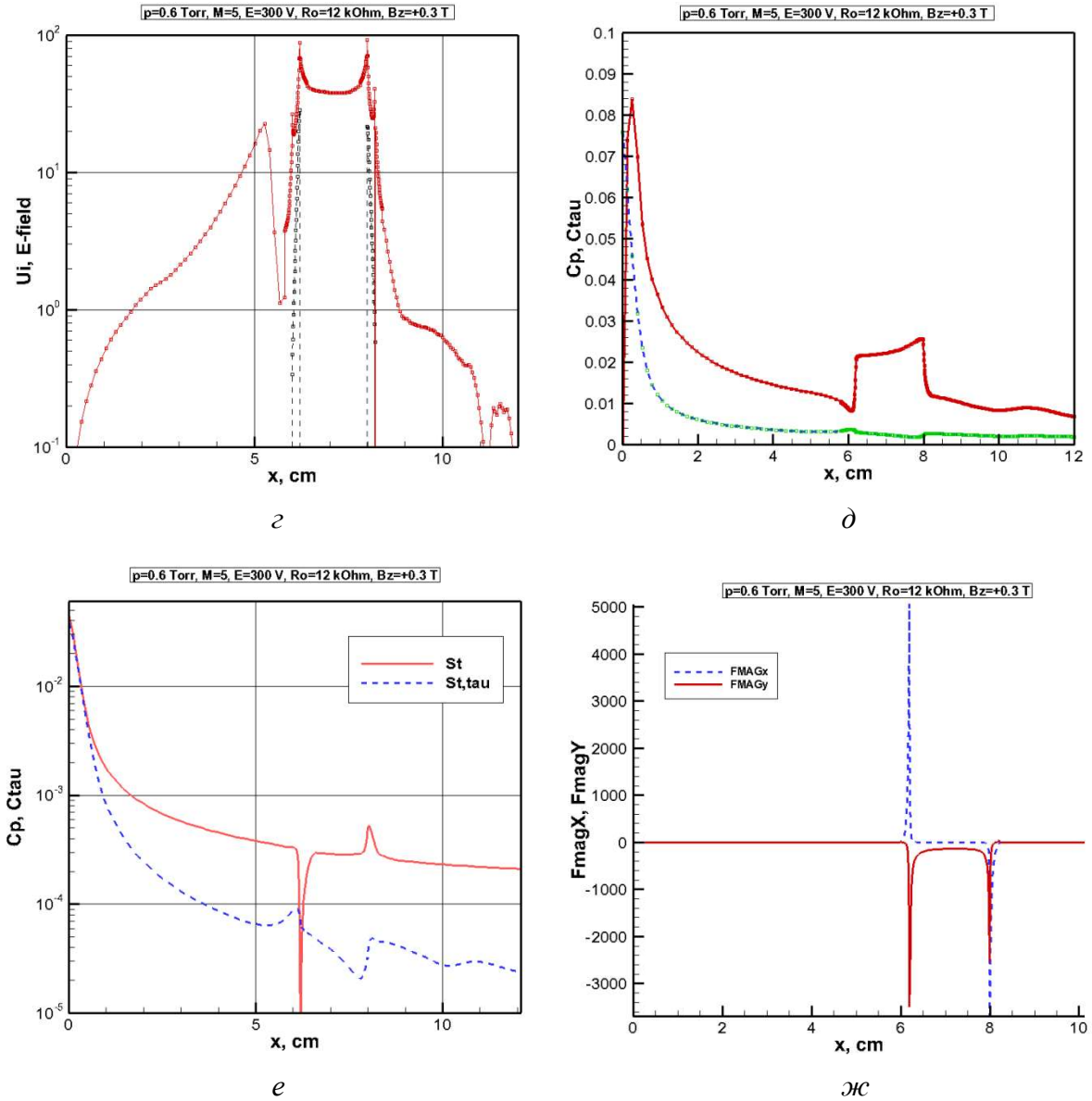
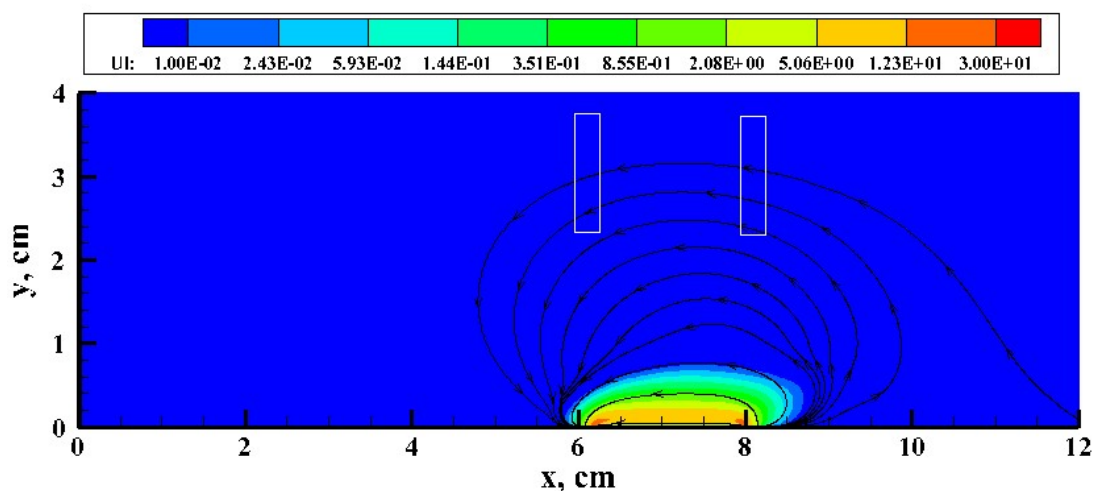


Рис. 11. Аномальный тлеющий разряд между двумя плоскими электродами, расположенными на поверхности обтекаемой пластины при исходных данных: $p_{\infty} = 0.784 \times 10^3$ эрг/см³ ($p_{\infty} = 0.6$ Тор), $\rho_{\infty} = 0.636 \times 10^{-5}$ г/см³, $T_{\infty} = 41.5$ К, $V_{\infty} = 0.676 \times 10^5$ см/с ($M = 5$), $\varepsilon = 300$ В, $R_0 = 12$ кОм, $B_z = +0.3$ Тл

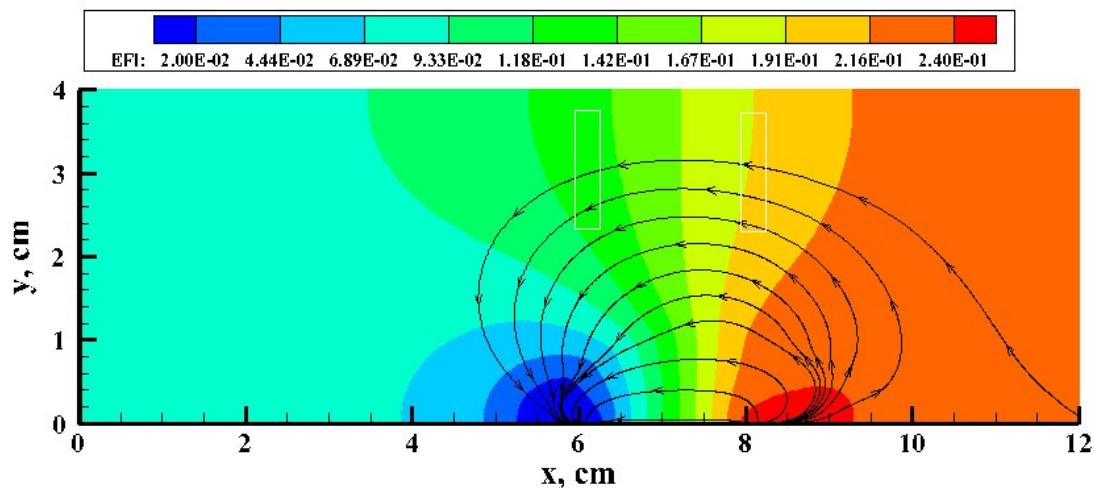
- а) концентрация заряженных частиц, 10^9 см⁻³;
- б) электрический потенциал, ϕ/ε ;
- в) плотность электрического тока, А/см²;
- г) распределение концентраций заряженных частиц (10^9 см⁻³) и напряженности электрического поля E_y (В/см) вдоль поверхности;
- д) распределение коэффициентов C_p и C_{τ} вдоль поверхности;
- е) распределение критериев St и St_{τ} вдоль поверхности;
- ж) распределение компонент магнитной силы вдоль поверхности, дин/см²

$p=0.6$ Torr, $M=5$, $E=300$ V, $R_o=12$ kOhm, $B_z=-0.1$ T



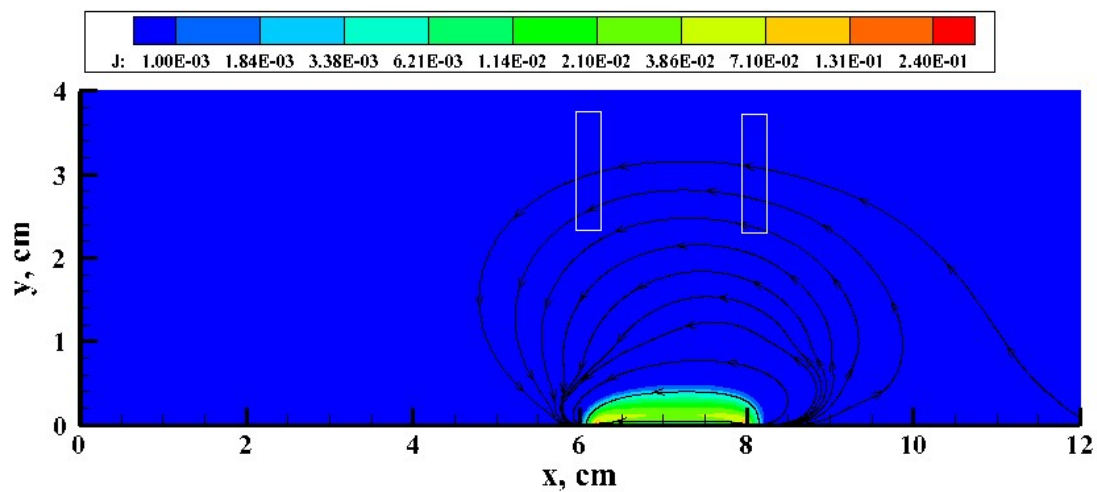
a

$p=0.6$ Torr, $M=5$, $E=300$ V, $R_o=12$ kOhm, $B_z=-0.1$ T



b

$p=0.6$ Torr, $M=5$, $E=300$ V, $R_o=12$ kOhm, $B_z=-0.1$ T



c

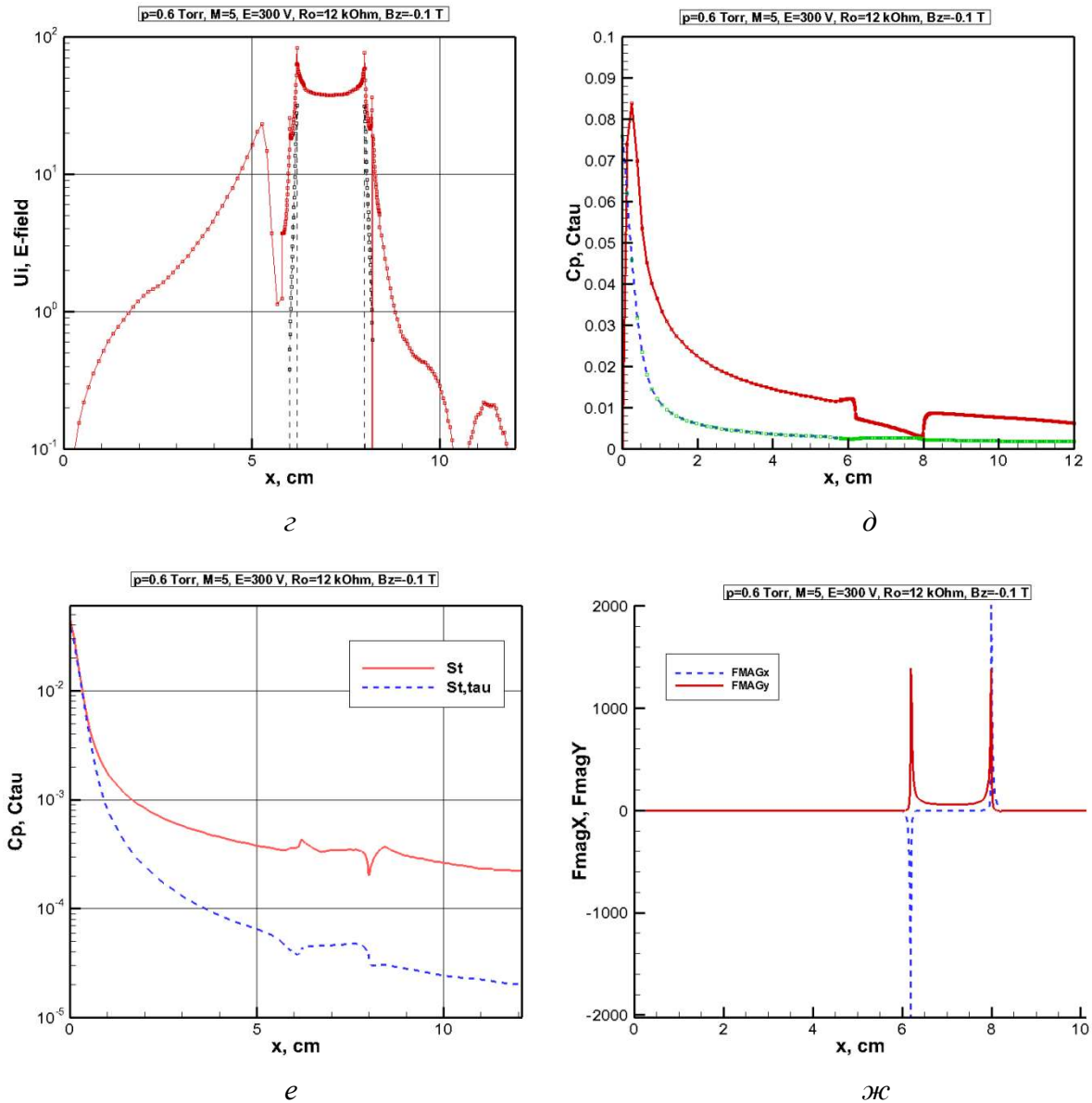
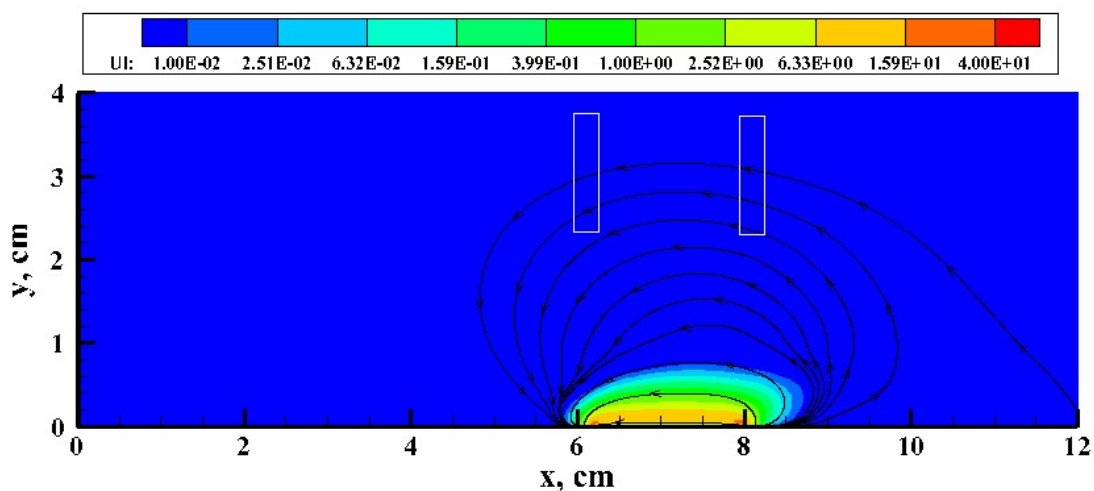


Рис. 12. Аномальный тлеющий разряд между двумя плоскими электродами, расположенными на поверхности обтекаемой пластины при исходных данных: $p_{\infty} = 0.784 \times 10^3$ эрг/см³ ($p_{\infty} = 0.6$ Тор), $\rho_{\infty} = 0.636 \times 10^{-5}$ г/см³, $T_{\infty} = 41.5$ К, $V_{\infty} = 0.676 \times 10^5$ см/с ($M = 5$), $\varepsilon = 300$ В, $R_0 = 12$ кОм, $B_z = -0.1$ Тл

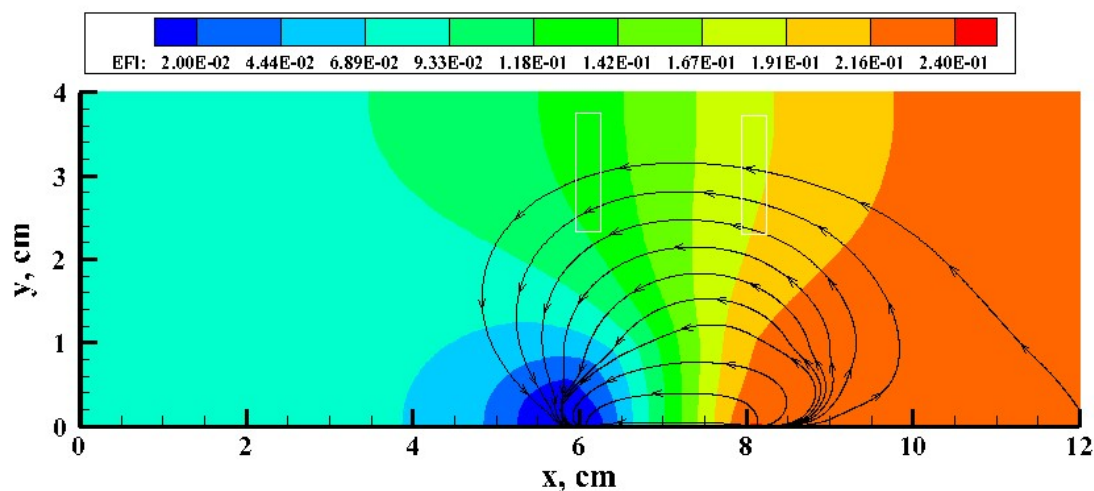
- а) концентрация заряженных частиц, 10^9 см⁻³;
- б) электрический потенциал, φ/ε ;
- в) плотность электрического тока, А/см²;
- г) распределение концентраций заряженных частиц (10^9 см⁻³) и напряженности электрического поля E_y (В/см) вдоль поверхности;
- д) распределение коэффициентов C_p и C_{τ} вдоль поверхности;
- е) распределение критериев St и St_{τ} вдоль поверхности;
- ж) распределение компонент магнитной силы вдоль поверхности, дин/см²

$p=0.6$ Torr, $M=5$, $E=300$ V, $R_o=12$ kOhm, $B_z=-0.3$ T



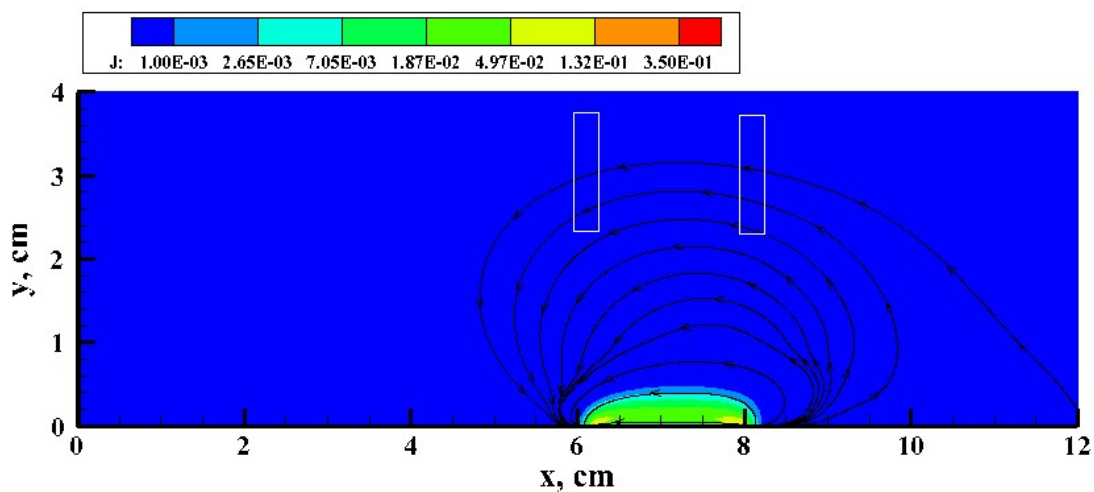
a

$p=0.6$ Torr, $M=5$, $E=300$ V, $R_o=12$ kOhm, $B_z=-0.3$ T



b

$p=0.6$ Torr, $M=5$, $E=300$ V, $R_o=12$ kOhm, $B_z=-0.3$ T



c

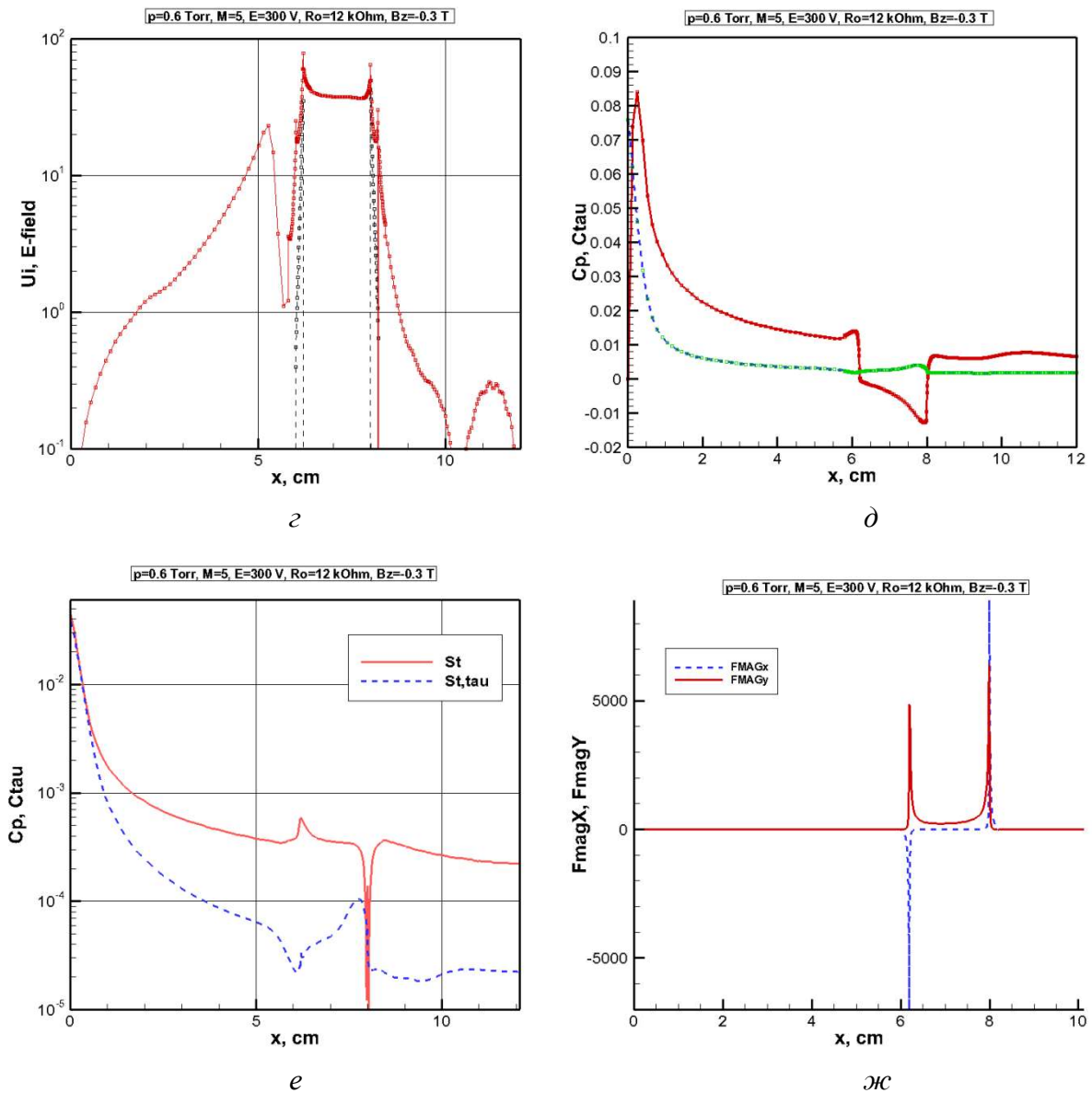
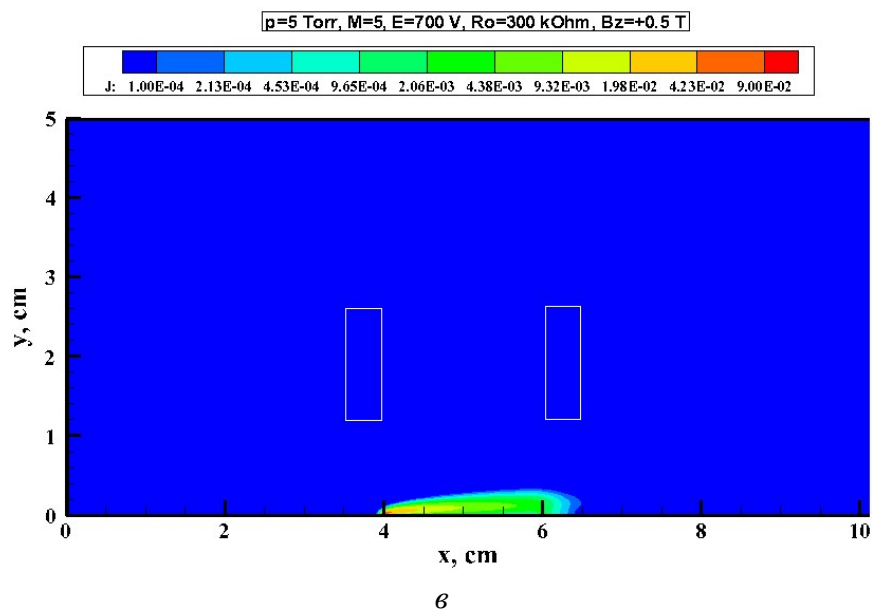
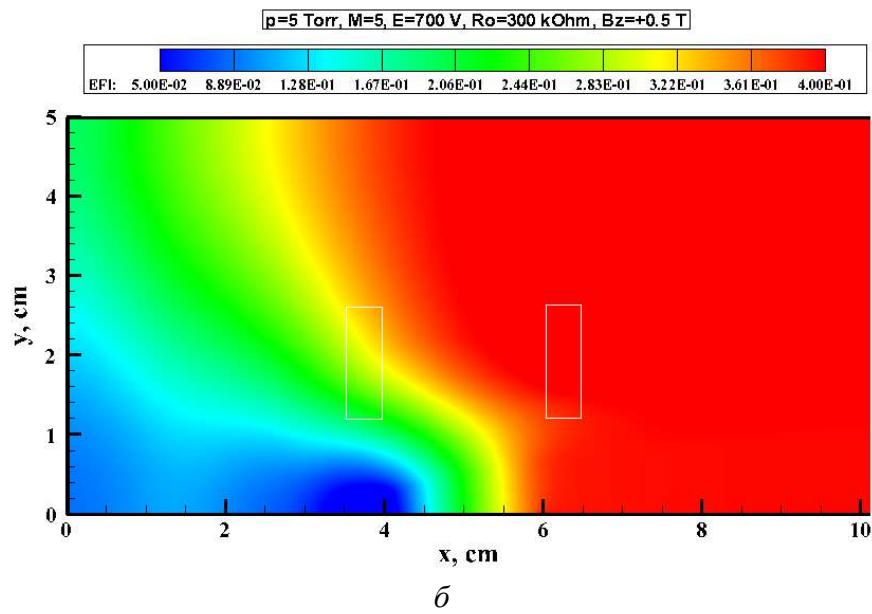
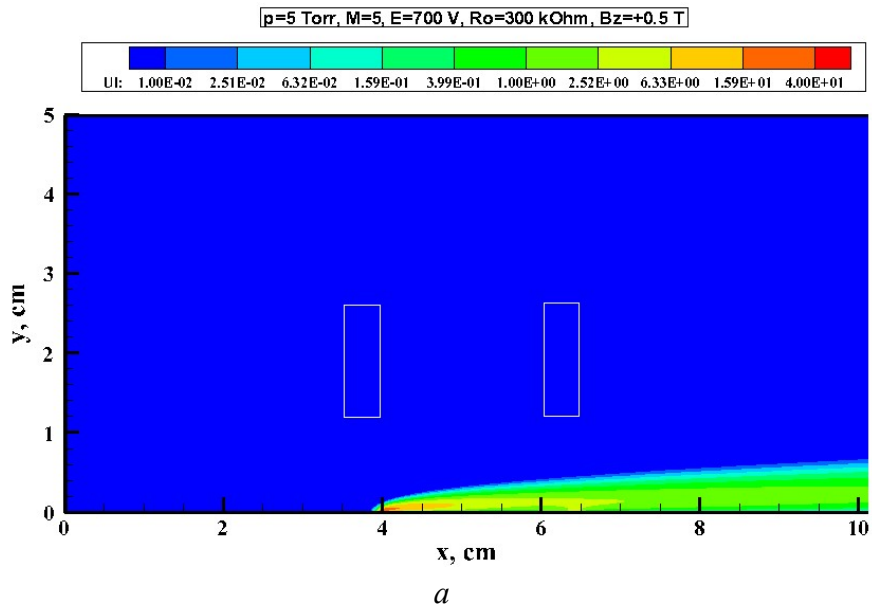
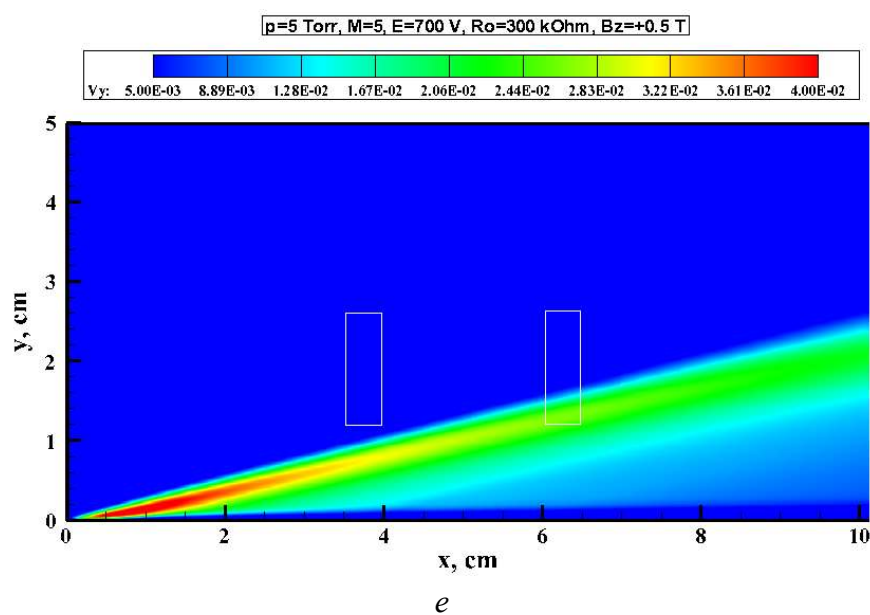
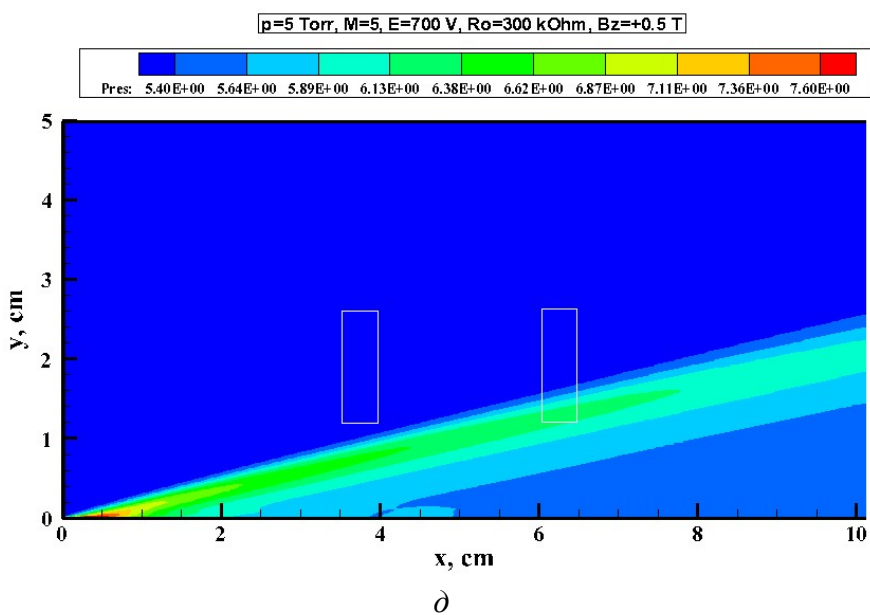
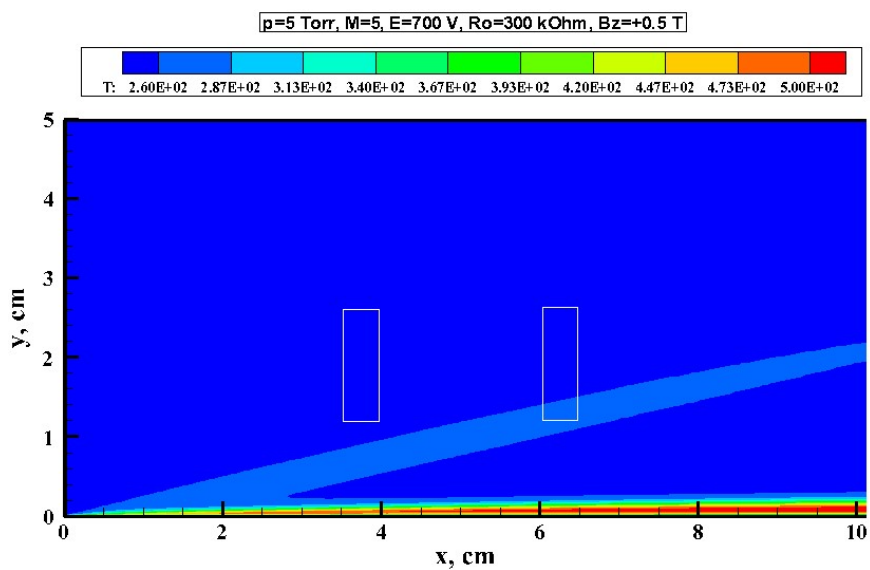


Рис. 13. Аномальный тлеющий разряд между двумя плоскими электродами, расположенными на поверхности обтекаемой пластины при исходных данных: $p_{\infty} = 0.784 \times 10^3$ эрг/см³ ($p_{\infty} = 0.6$ Тор), $\rho_{\infty} = 0.636 \times 10^{-5}$ г/см³, $T_{\infty} = 41.5$ К, $V_{\infty} = 0.676 \times 10^5$ см/с ($M = 5$), $\varepsilon = 300$ В, $R_0 = 12$ кОм, $B_z = -0.3$ Тл

- а) концентрация заряженных частиц, 10^9 см⁻³;
- б) электрический потенциал, φ/ε ;
- в) плотность электрического тока, А/см²;
- г) распределение концентраций заряженных частиц (10^9 см⁻³) и напряженности электрического поля E_y (В/см) вдоль поверхности;
- д) распределение коэффициентов C_p и C_{τ} вдоль поверхности;
- е) распределение критериев St и St_{τ} вдоль поверхности;
- ж) распределение компонент магнитной силы вдоль поверхности, дин/см²





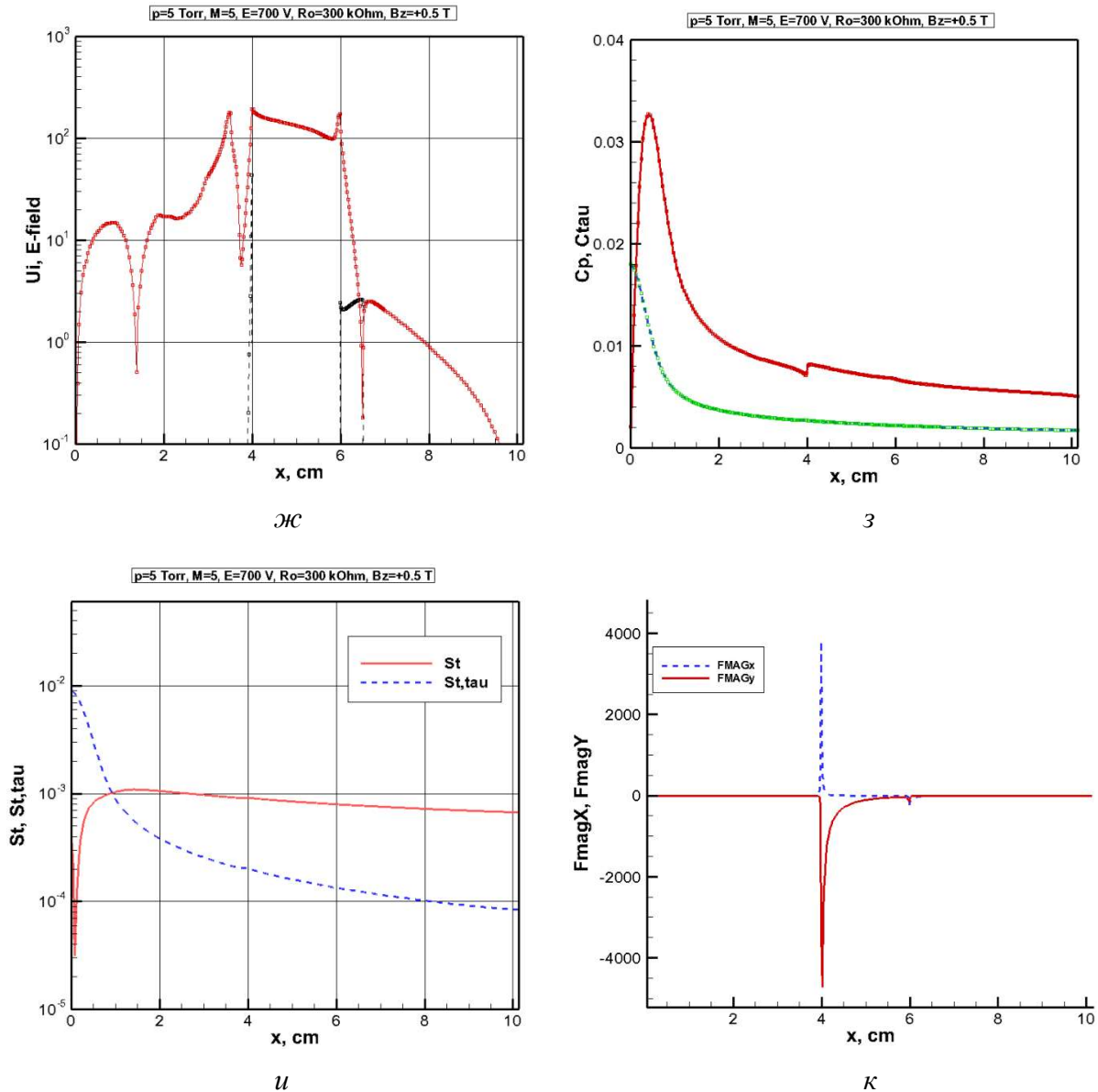
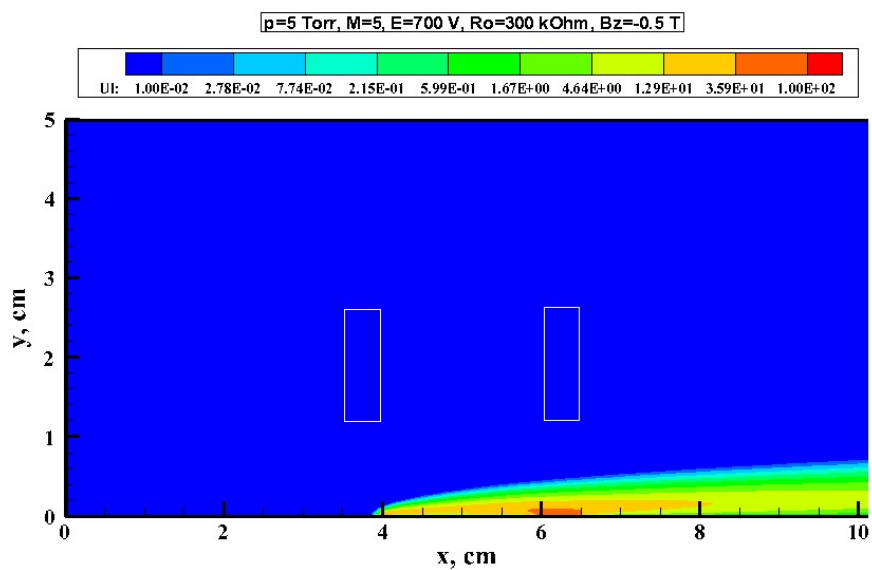
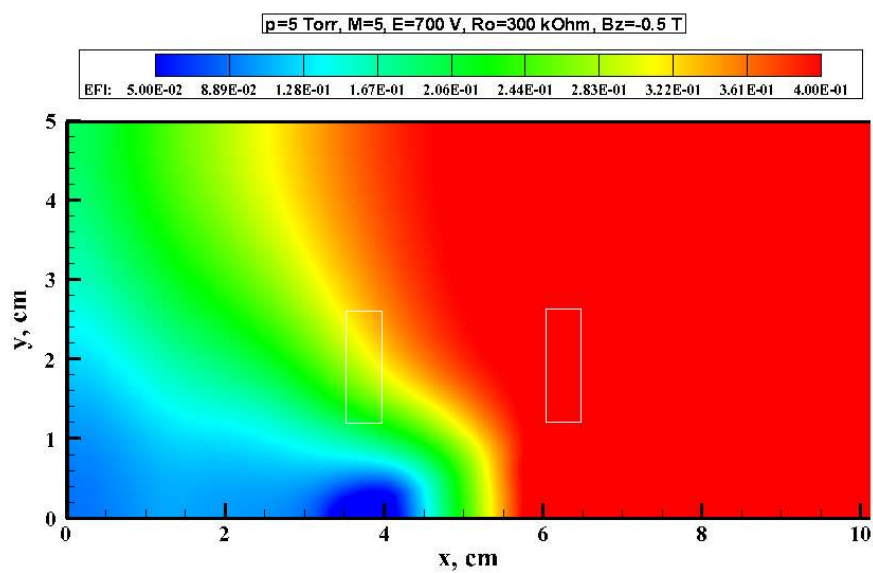


Рис. 14. Аномальный тлеющий разряд между двумя плоскими электродами, расположенными на поверхности обтекаемой пластины при исходных данных: $p_\infty = 0.658 \times 10^4$ эрг/см³ ($p_\infty = 5$ Тор), $\rho_\infty = 0.918 \times 10^{-5}$ г/см³, $T_\infty = 250$ К, $V_\infty = 1.576 \times 10^5$ см/с ($M=5$), $\varepsilon = 700$ В, $R_0 = 300$ кОм, $B_z = +0.5$ Тл

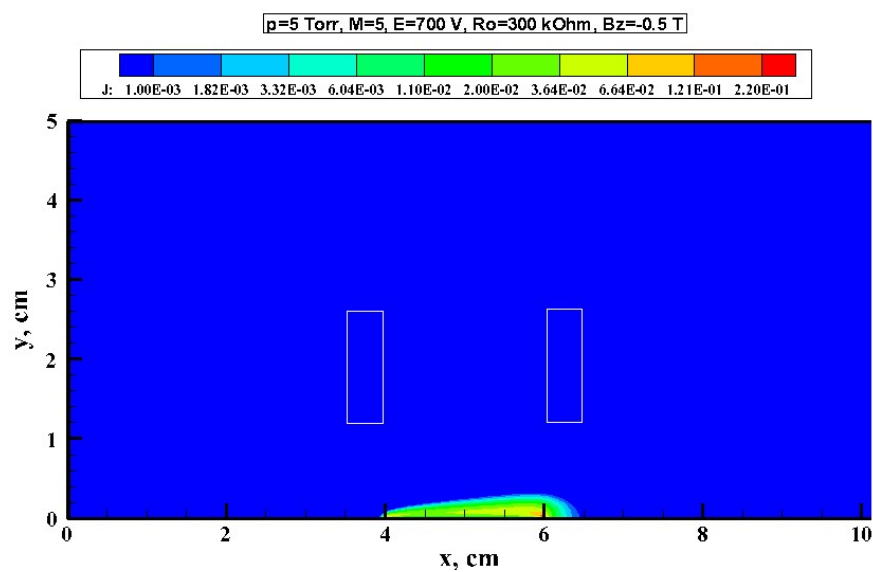
- а) концентрация заряженных частиц, 10^9 см^{-3} ;
- б) электрический потенциал, φ/ε ;
- в) плотность электрического тока, А/см^2 ;
- г) температурное поле, К;
- д) давление, Тор;
- е) скорость $V_y, v/V_\infty$;
- ж) распределение концентраций заряженных частиц (10^9 см^{-3}) и напряженности электрического поля E_y (В/см) вдоль поверхности;
- з) распределение коэффициентов C_p и C_τ вдоль поверхности;
- и) распределение критериев St и St_τ вдоль поверхности;
- к) распределение компонент магнитной силы вдоль поверхности, дин/см^2



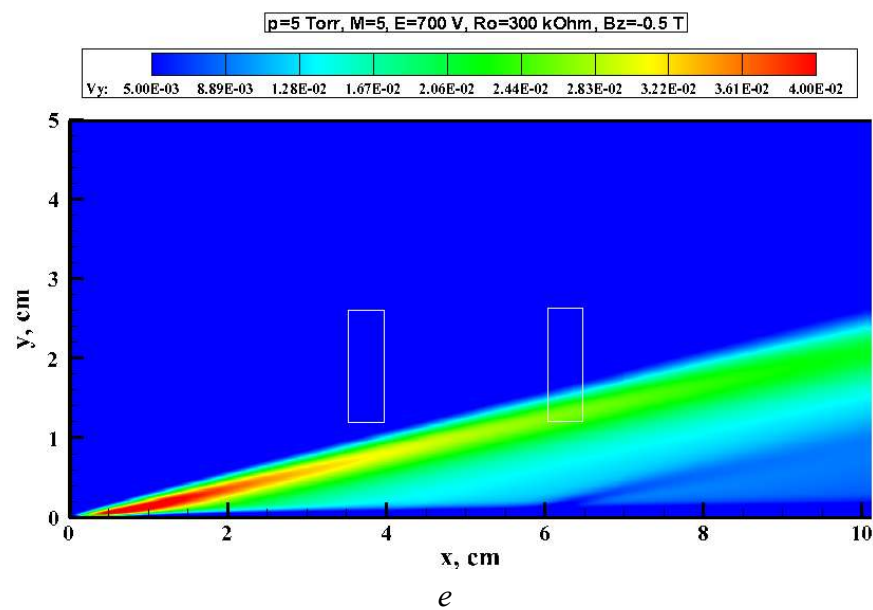
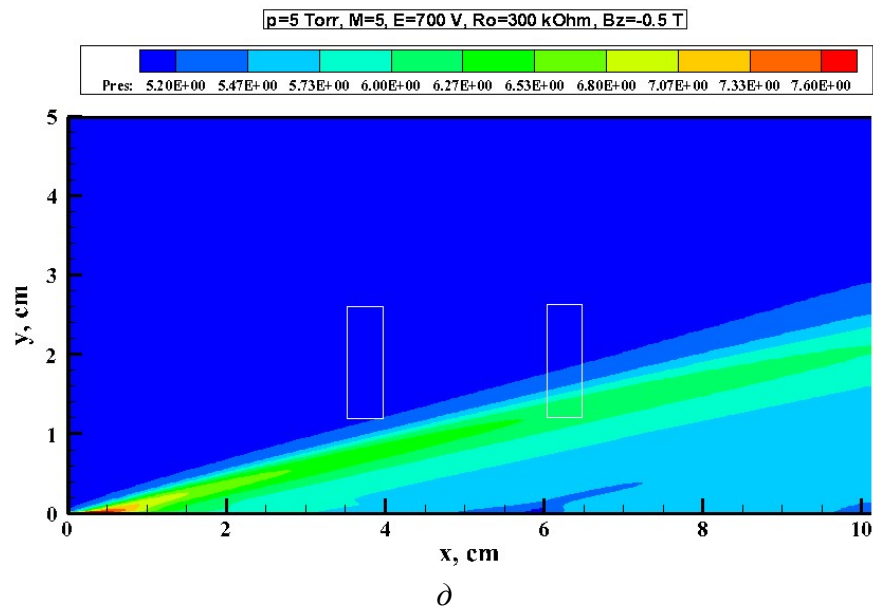
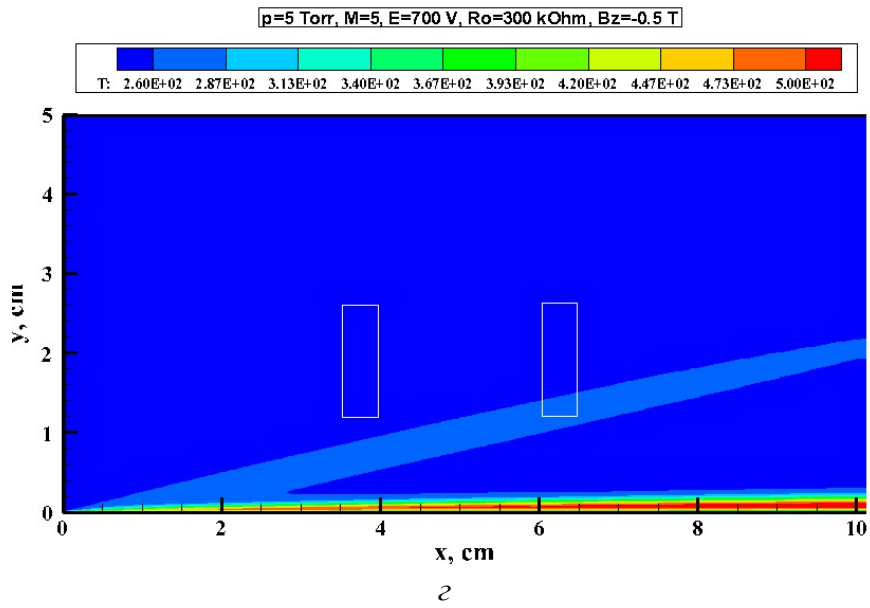
a



b



c



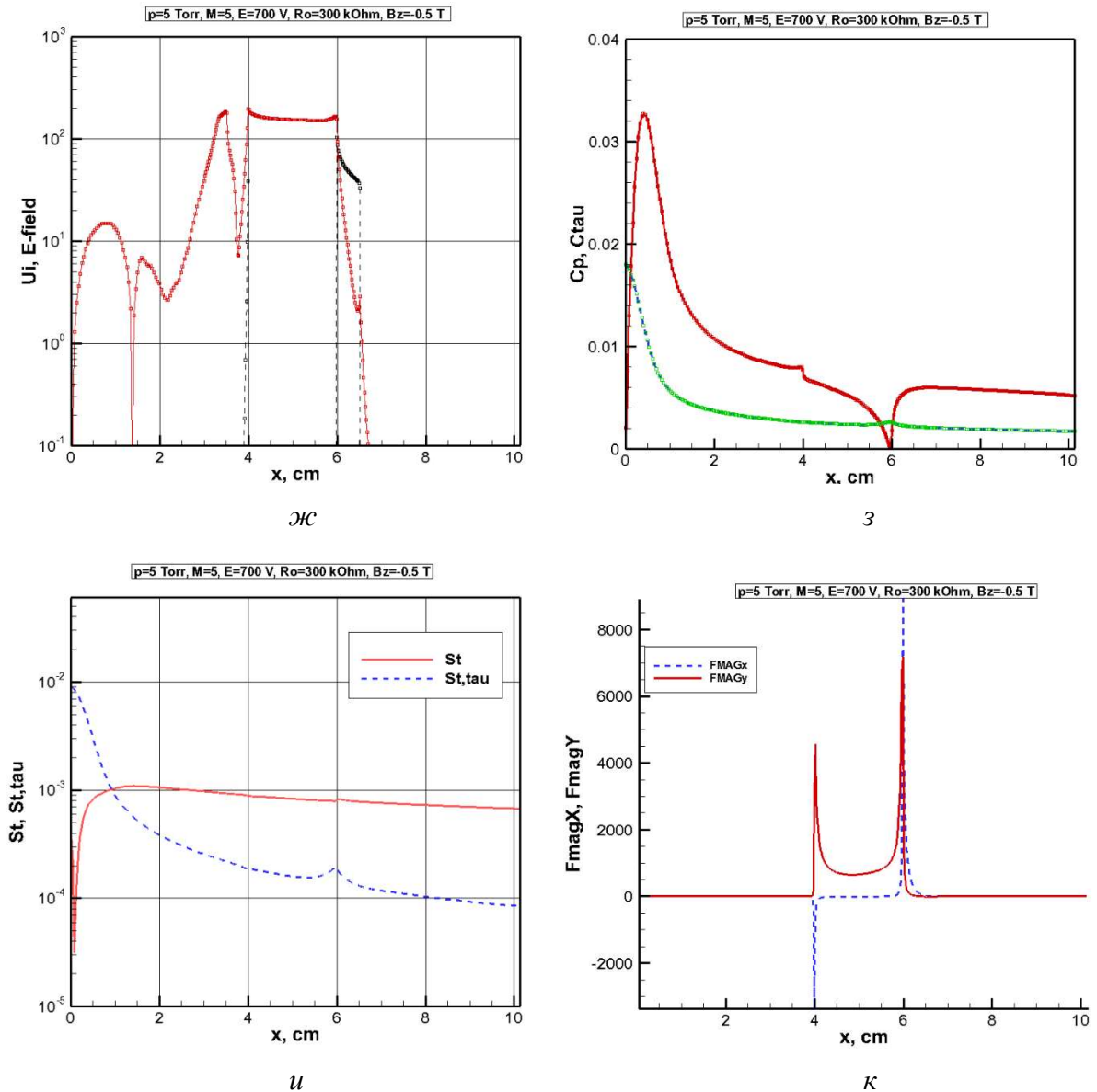
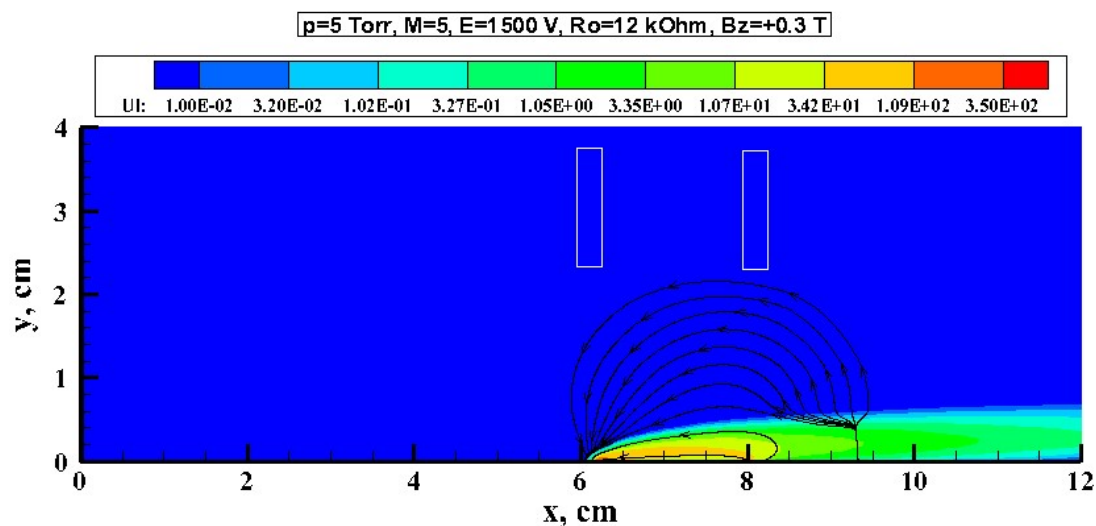
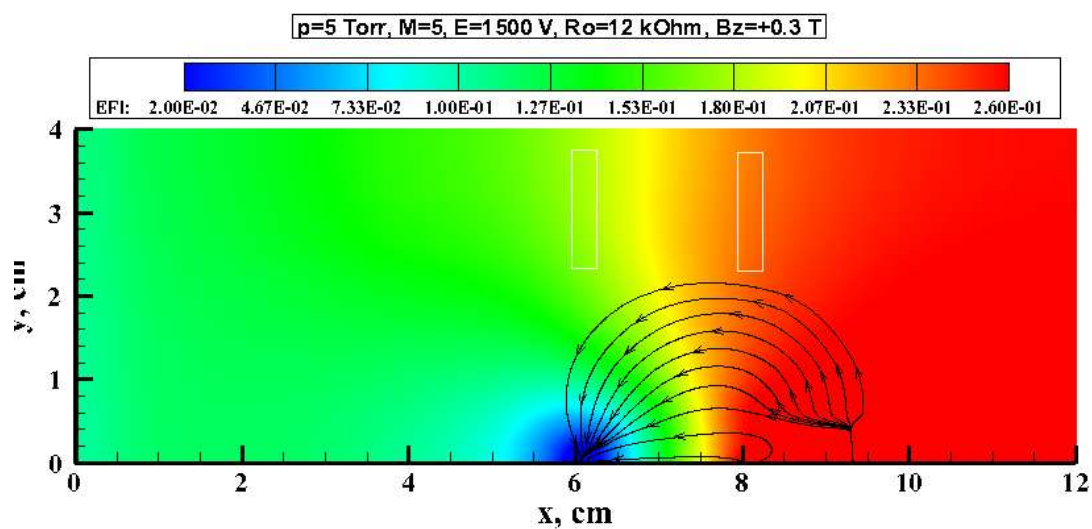


Рис. 15. Аномальный тлеющий разряд между двумя плоскими электродами, расположенными на поверхности обтекаемой пластины при исходных данных: $p_{\infty} = 0.658 \times 10^4$ эрг/см³ ($p_{\infty} = 5$ Тор), $\rho_{\infty} = 0.918 \times 10^{-5}$ г/см³, $T_{\infty} = 250$ К, $V_{\infty} = 1.576 \times 10^5$ см/с ($M = 5$), $\varepsilon = 700$ В, $R_0 = 300$ кОм, $B_z = -0.5$ Тл

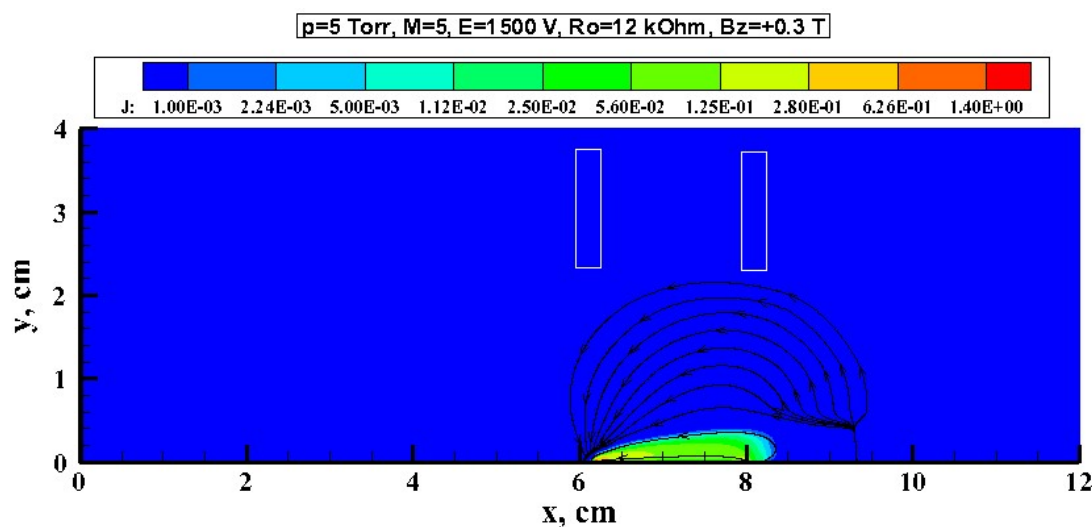
- а) концентрация заряженных частиц, 10^9 см⁻³;
- б) электрический потенциал, φ/ε ;
- в) плотность электрического тока, А/см²;
- г) температурное поле, К;
- д) давление, Тор;
- е) скорость $V_y, v/V_{\infty}$;
- ж) распределение концентраций заряженных частиц (10^9 см⁻³) и напряженности электрического поля E_y (В/см) вдоль поверхности;
- з) распределение коэффициентов C_p и C_{τ} вдоль поверхности;
- и) распределение критериев St и St_{τ} вдоль поверхности;
- к) распределение компонент магнитной силы вдоль поверхности, дин/см²



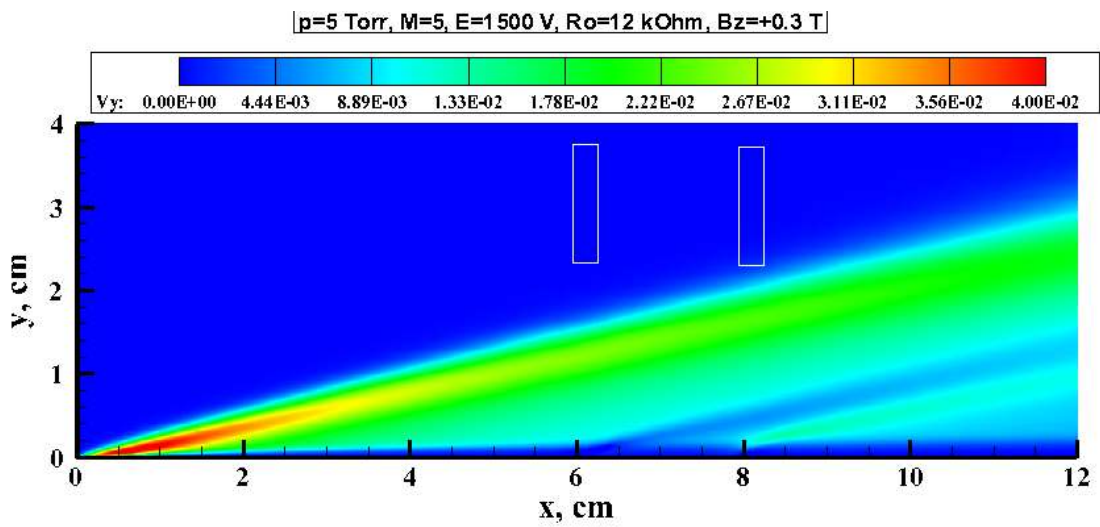
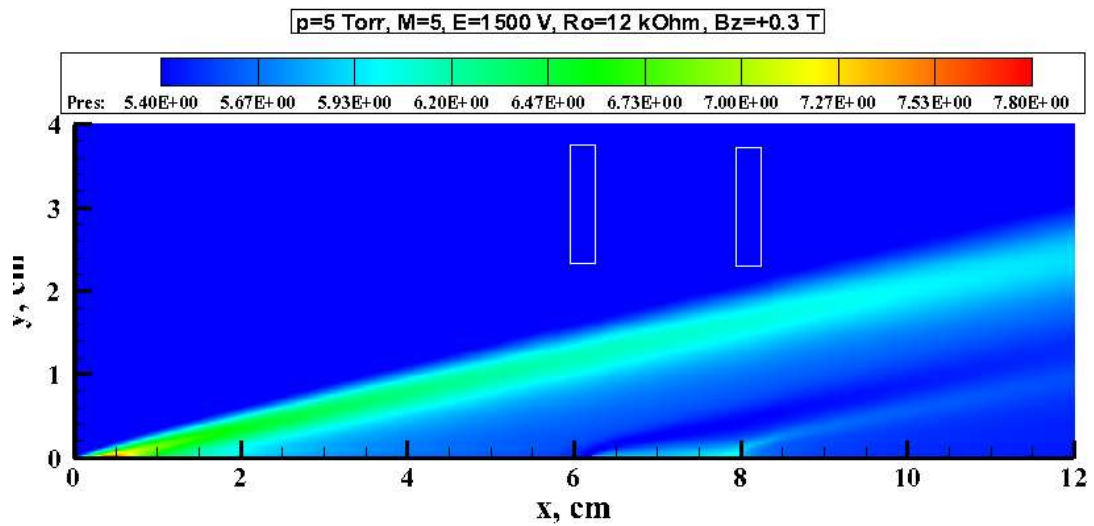
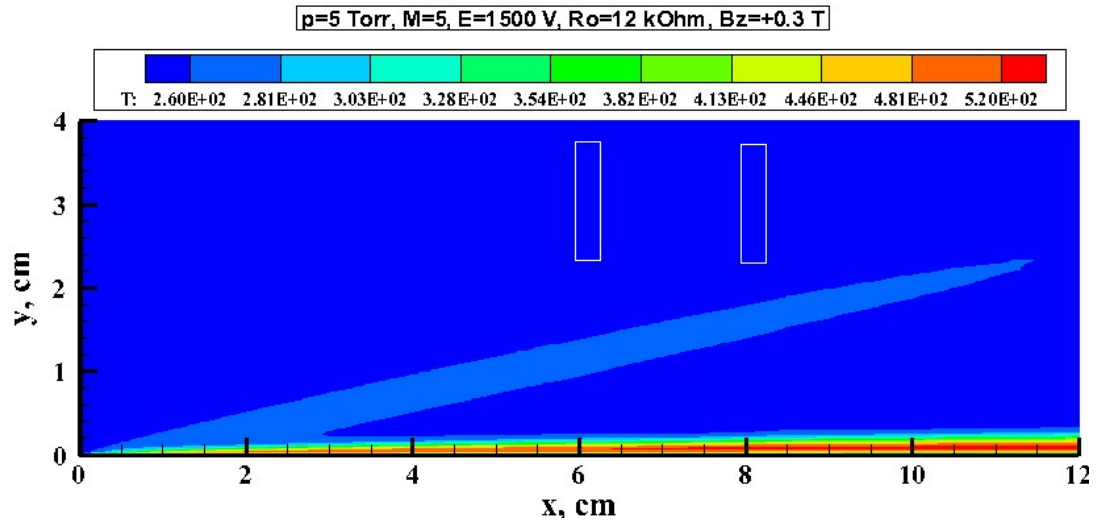
a



b



c



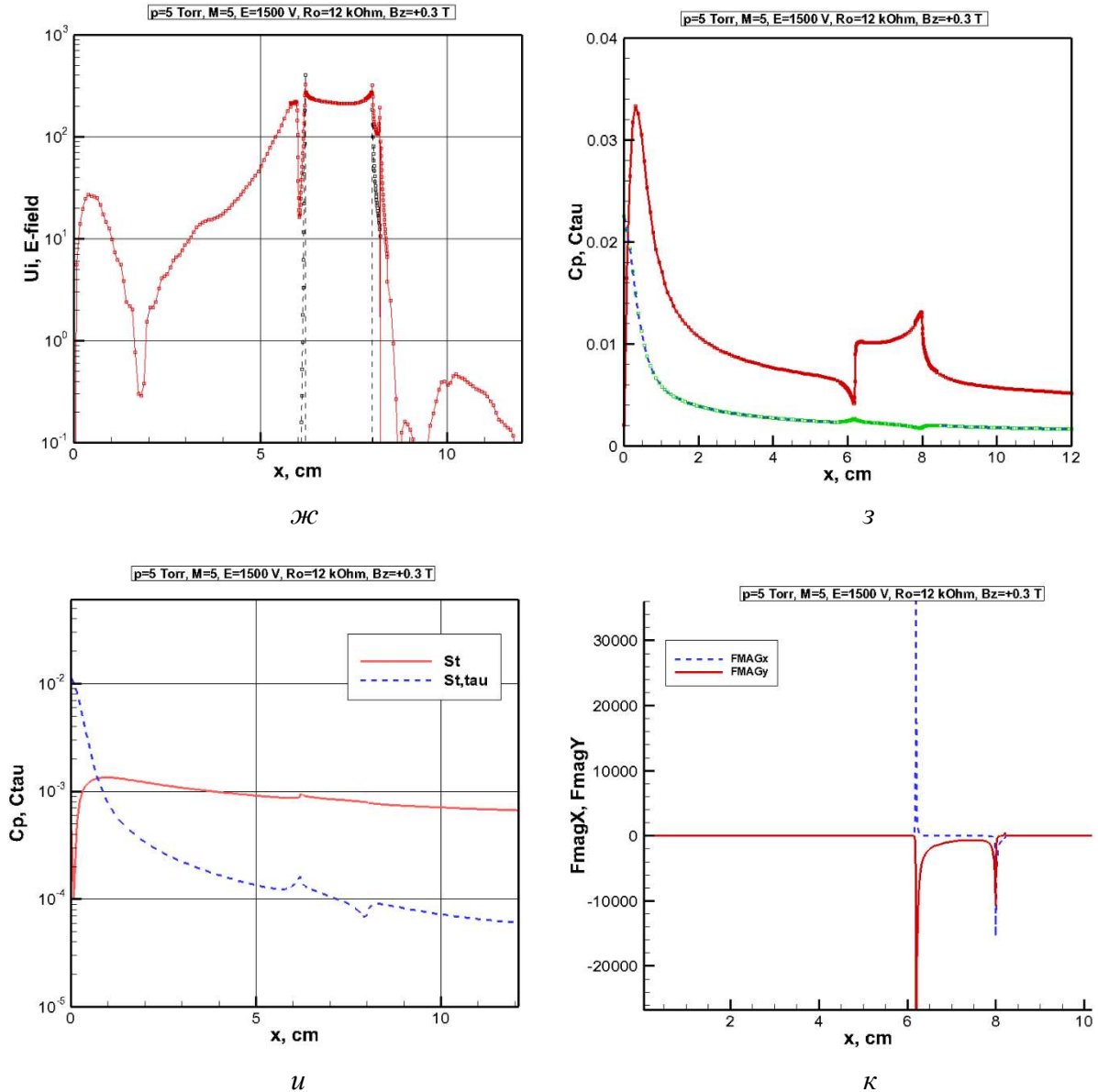
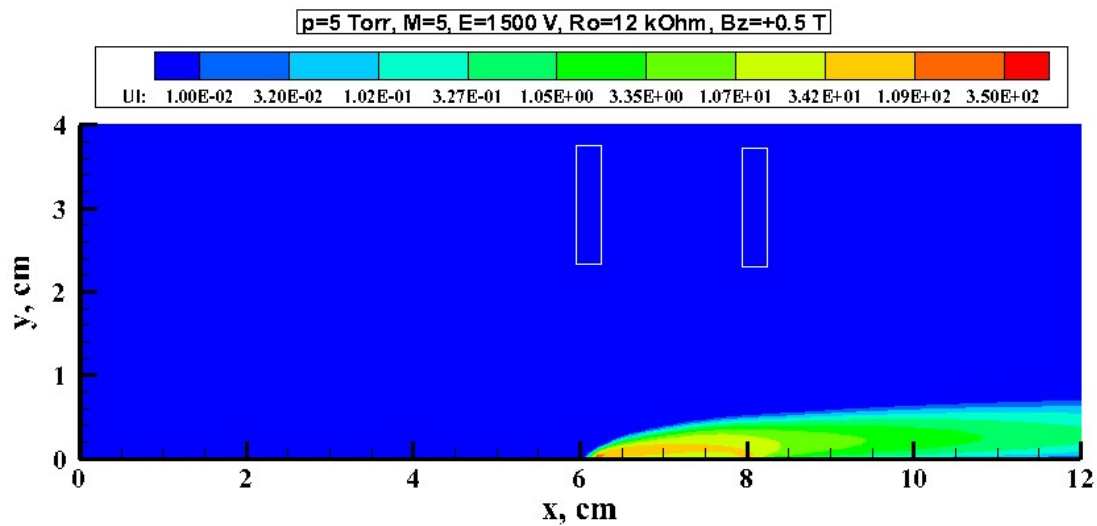
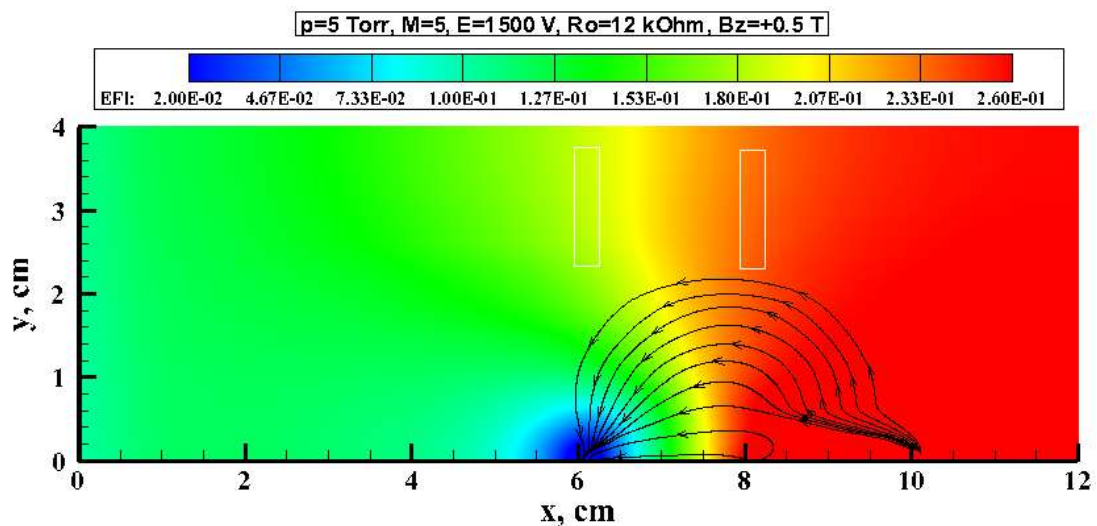


Рис. 16. Аномальный тлеющий разряд между двумя плоскими электродами, расположенными на поверхности обтекаемой пластины при исходных данных: $p_\infty = 0.658 \times 10^4$ эрг/см³ ($p_\infty = 5$ Тор), $\rho_\infty = 0.918 \times 10^{-5}$ г/см³, $T_\infty = 250$ К, $V_\infty = 1.576 \times 10^5$ см/с ($M = 5$), $\varepsilon = 1500$ В, $R_0 = 12$ кОм, $B_z = +0.3$ Тл

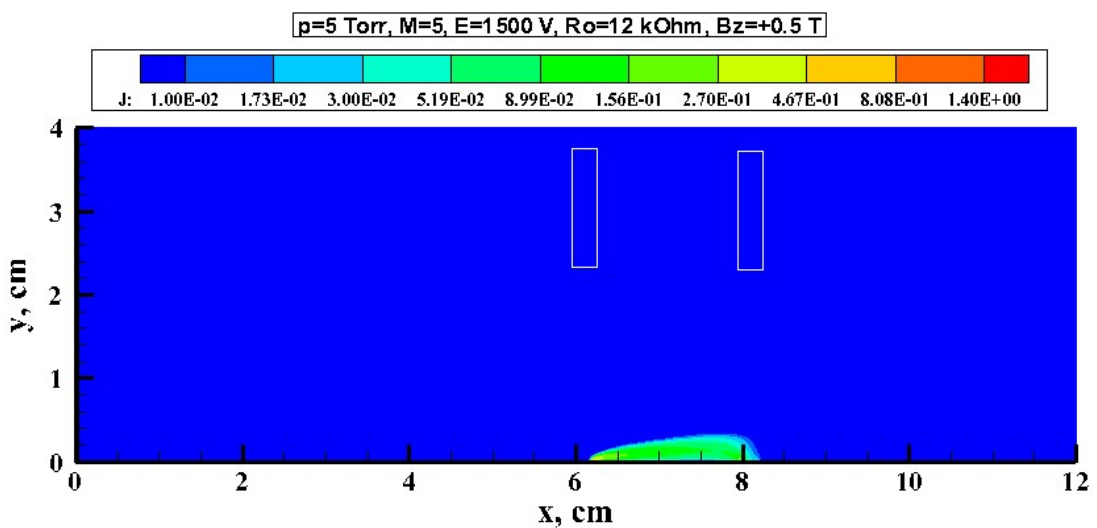
- а) концентрация заряженных частиц, 10^9 см⁻³;
- б) электрический потенциал, φ/ε ;
- в) плотность электрического тока, А/см²;
- г) температурное поле, К;
- д) давление, Тор;
- е) скорость $V_y, v/V_\infty$;
- ж) распределение концентраций заряженных частиц (10^9 см⁻³) и напряженности электрического поля E_y (В/см) вдоль поверхности;
- з) распределение коэффициентов C_p и C_t вдоль поверхности;
- и) распределение критериев St и St_τ вдоль поверхности;
- к) распределение компонент магнитной силы вдоль поверхности, дин/см²



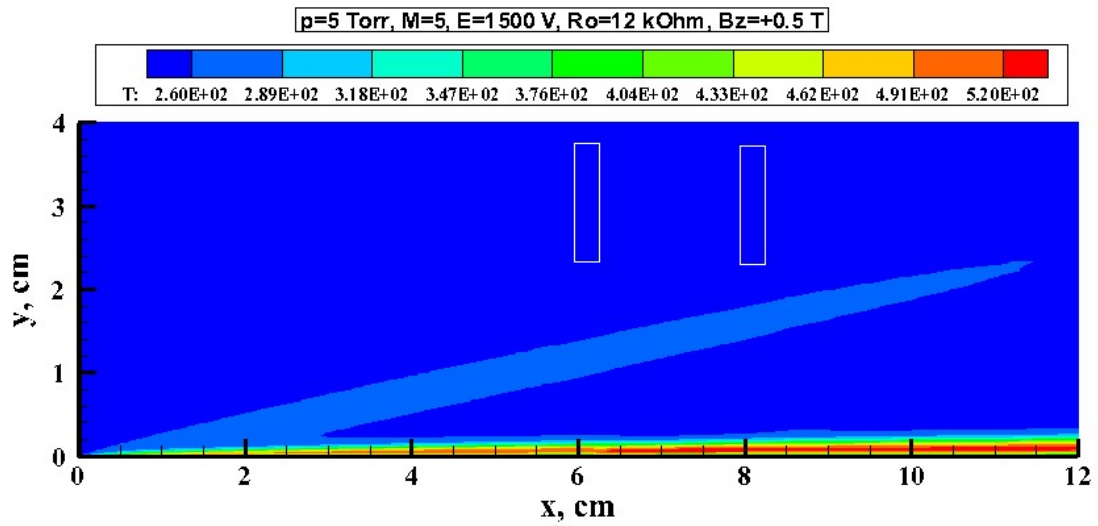
a



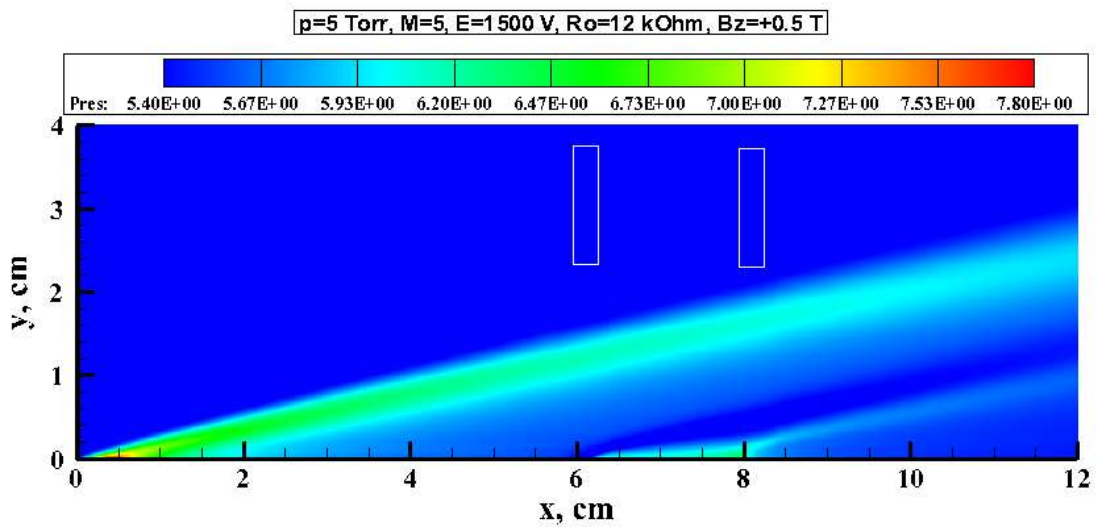
b



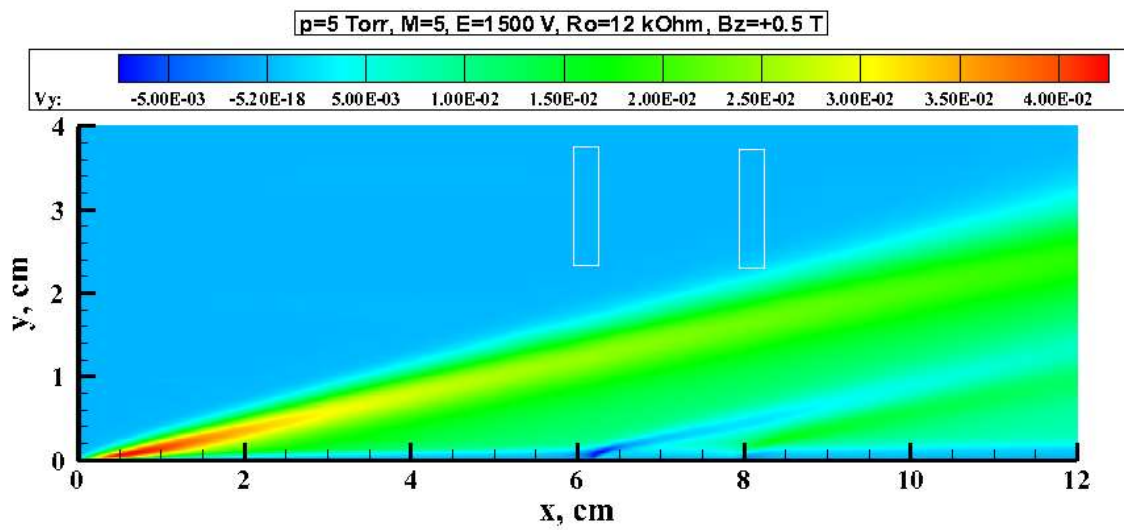
b



z



d



e

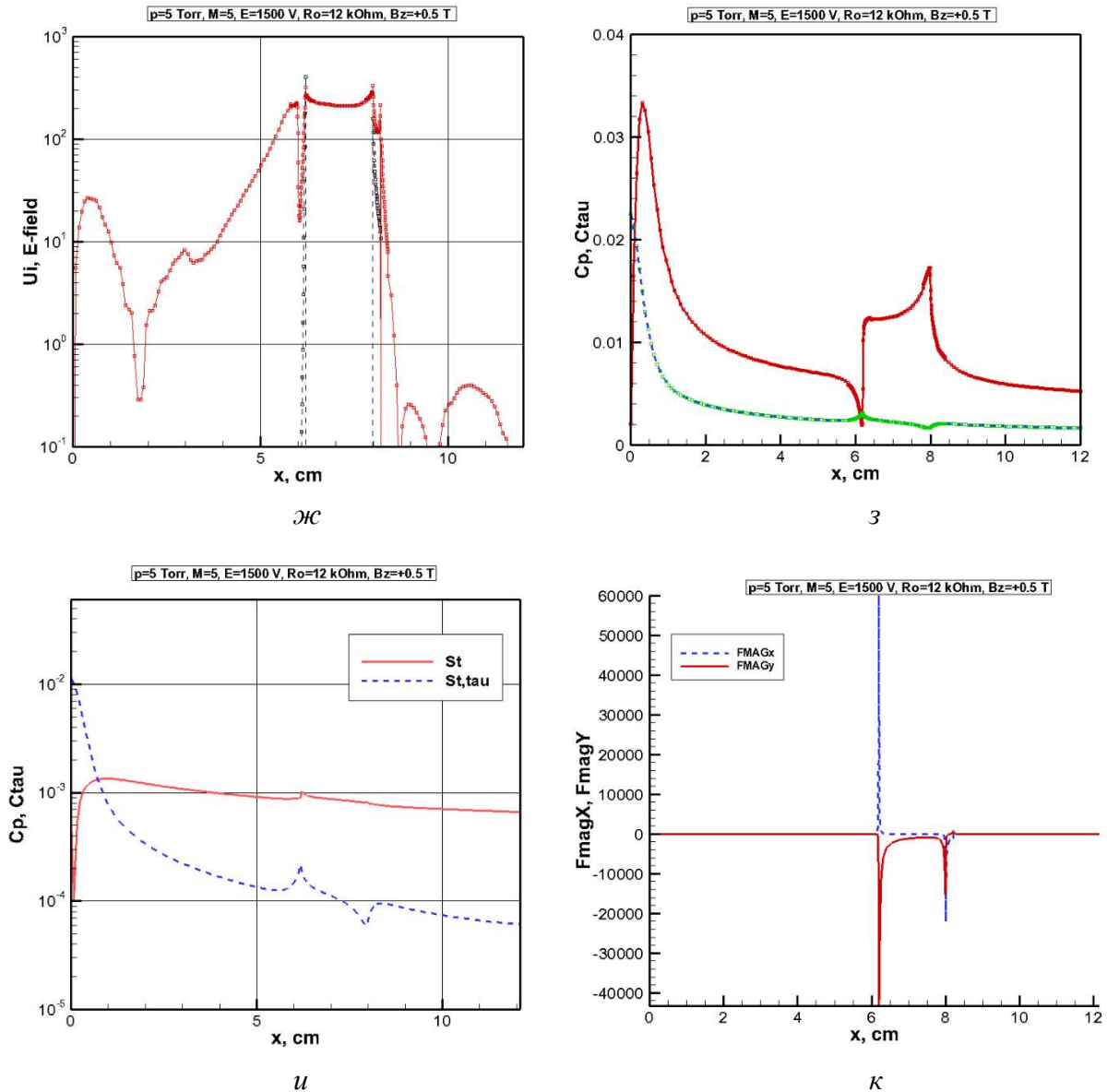
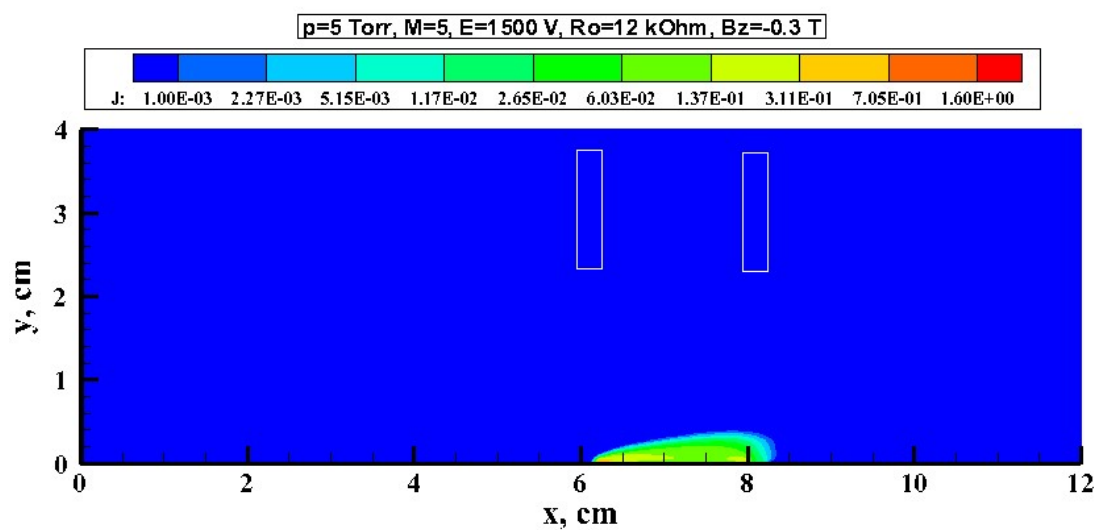
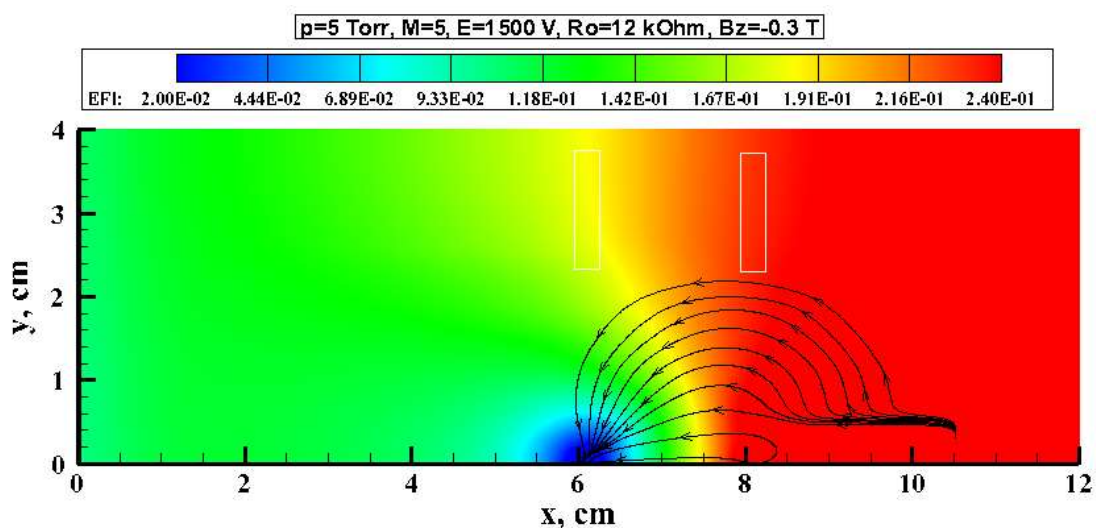
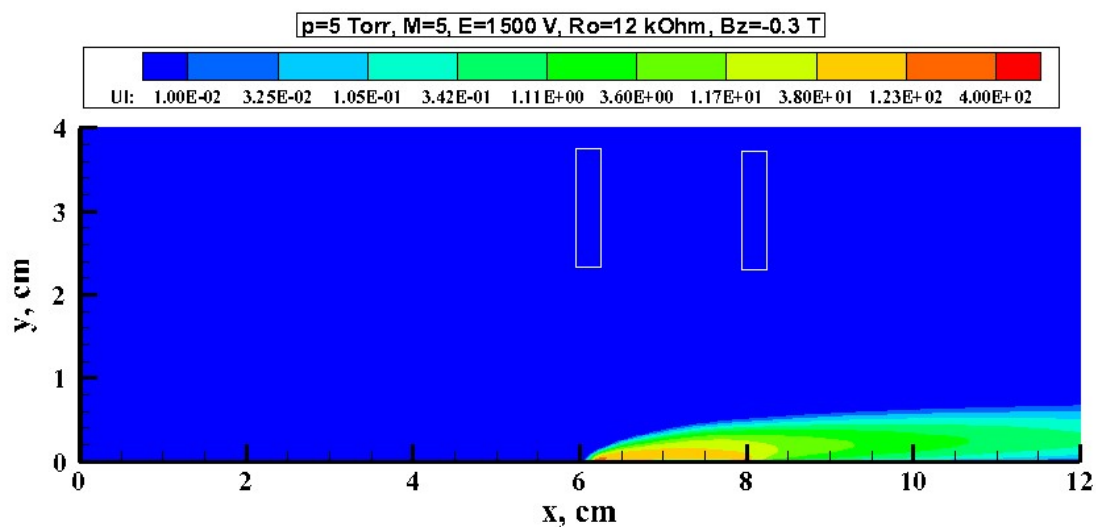
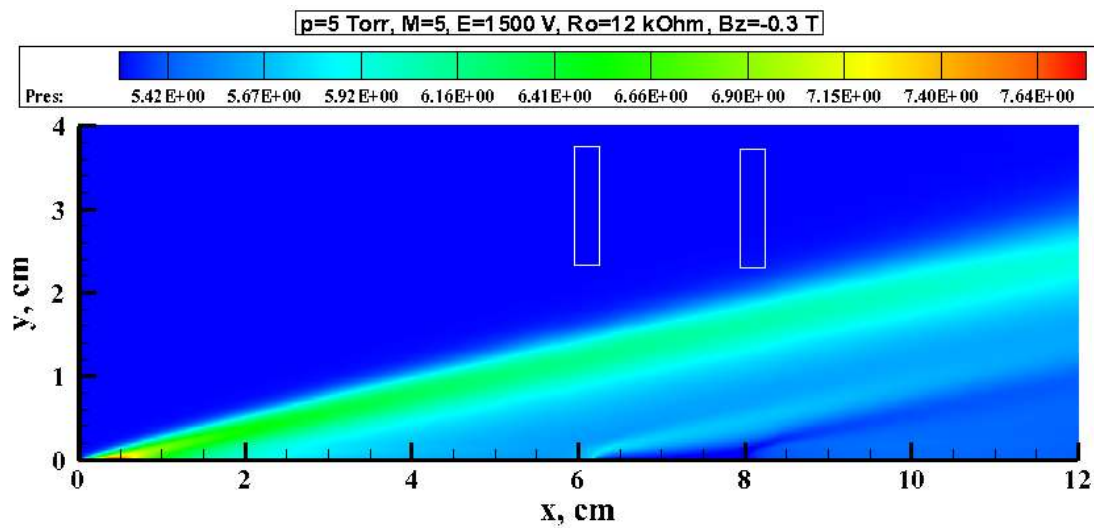
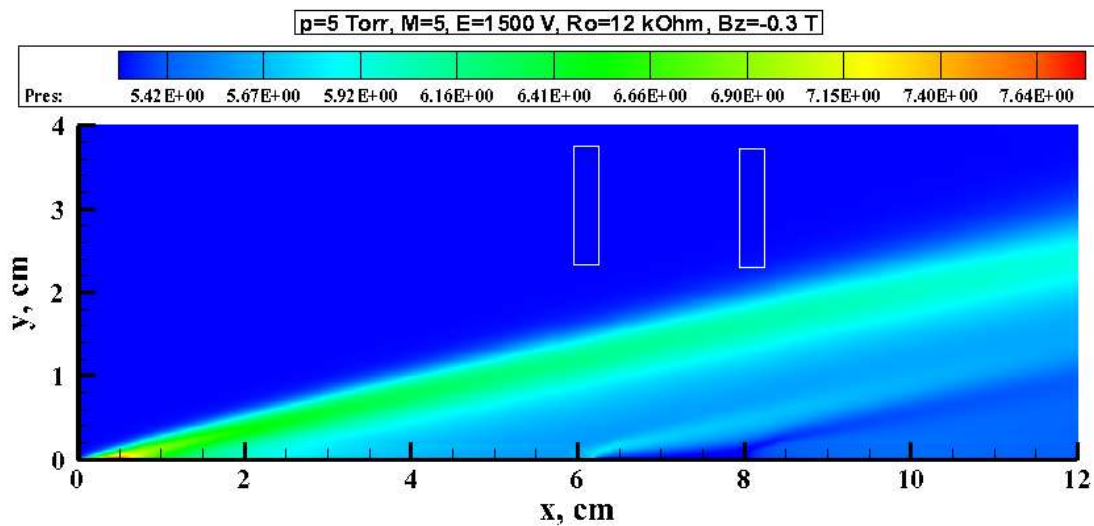
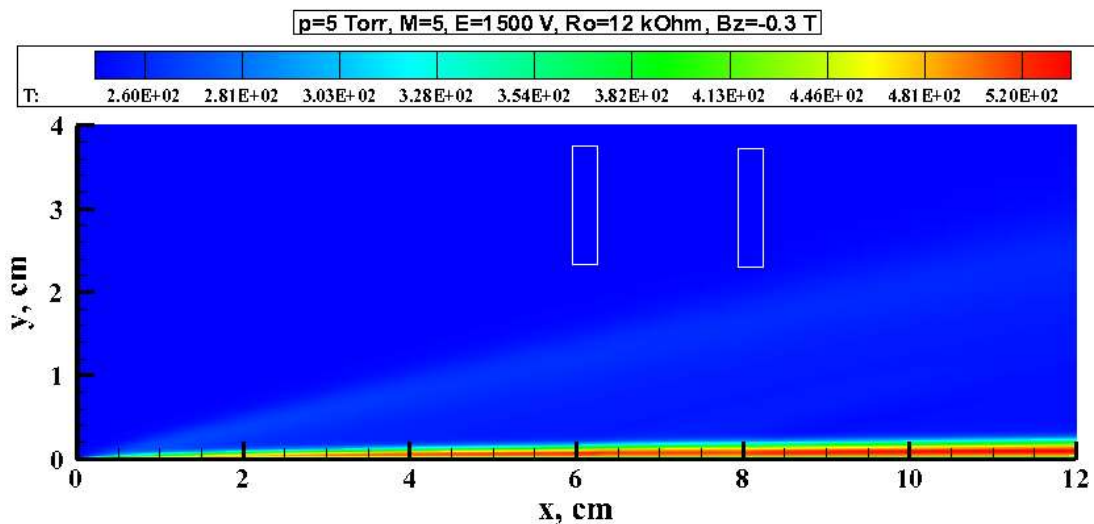


Рис. 17. Аномальный тлеющий разряд между двумя плоскими электродами, расположенными на поверхности обтекаемой пластины при исходных данных: $p_\infty = 0.658 \times 10^4$ эрг/см³ ($p_\infty = 5$ Тор), $\rho_\infty = 0.918 \times 10^{-5}$ г/см³, $T_\infty = 250$ К, $V_\infty = 1.576 \times 10^5$ см/с ($M = 5$), $\varepsilon = 1500$ В, $R_0 = 12$ кОм, $B_z = +0.5$ Тл

- а) концентрация заряженных частиц, 10^9 см⁻³;
- б) электрический потенциал, φ/ε ;
- в) плотность электрического тока, А/см²;
- г) температурное поле, К;
- д) давление, Тор;
- е) скорость $V_y, v/V_\infty$;
- ж) распределение концентраций заряженных частиц (10^9 см⁻³) и напряженности электрического поля E_y (В/см) вдоль поверхности;
- з) распределение коэффициентов C_p и C_t вдоль поверхности;
- и) распределение критериев St и St_τ вдоль поверхности;
- к) распределение компонент магнитной силы вдоль поверхности, дин/см²





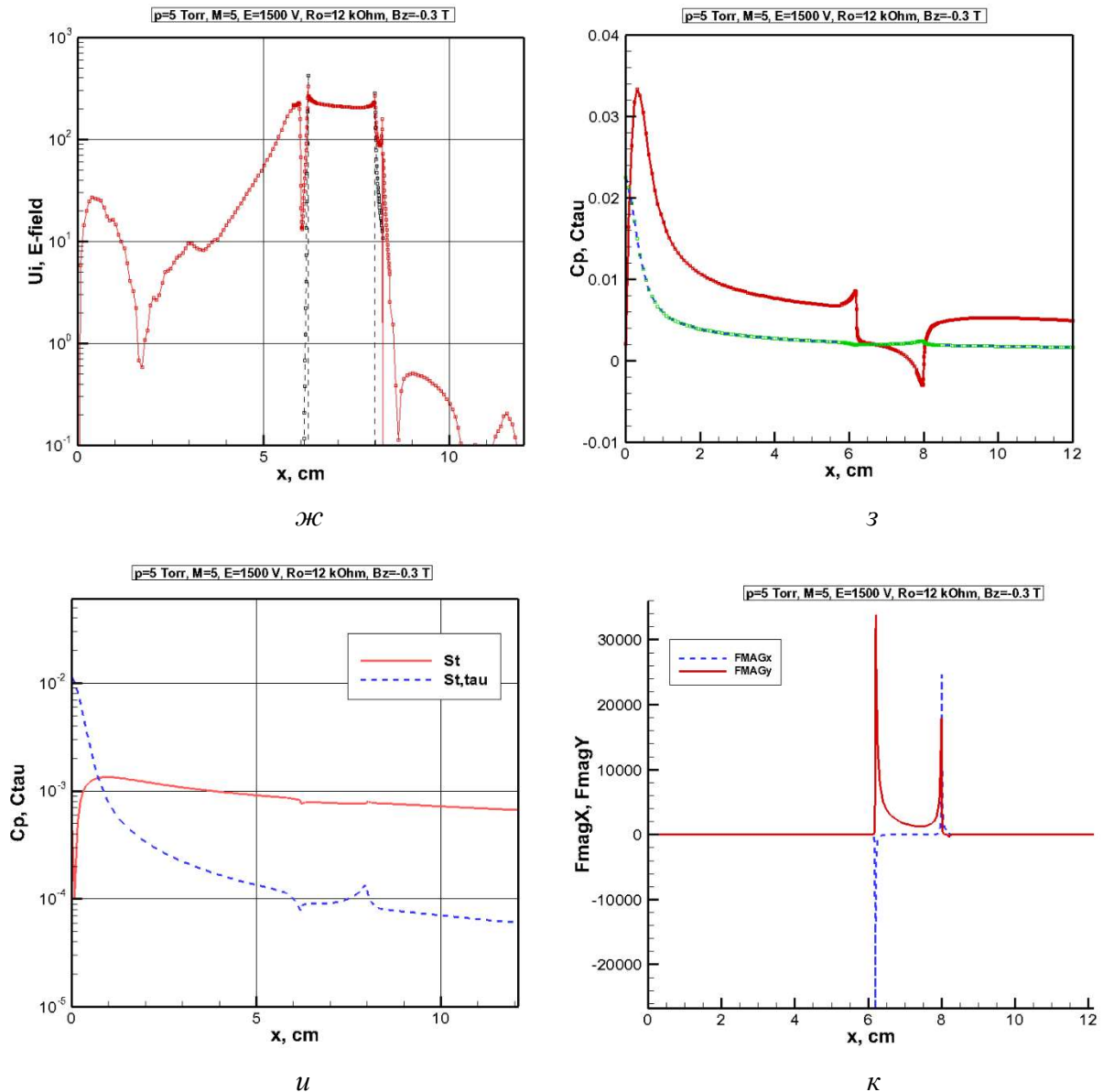
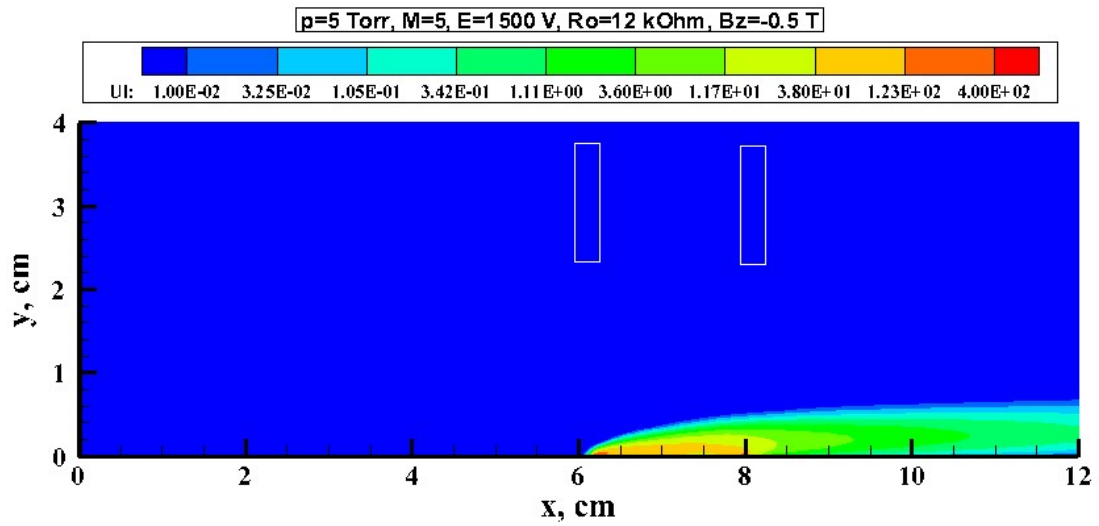
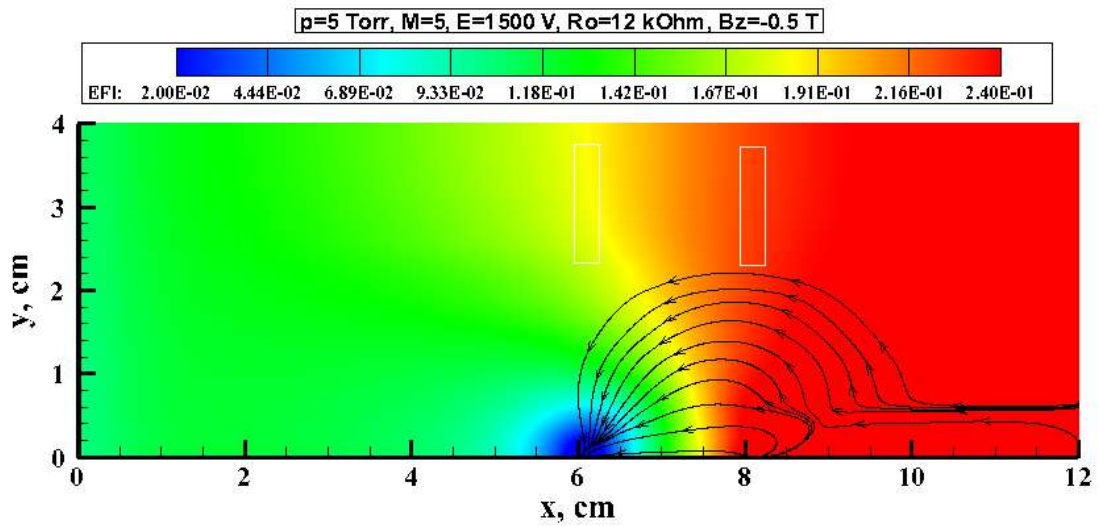


Рис. 18. Аномальный тлеющий разряд между двумя плоскими электродами, расположенными на поверхности обтекаемой пластины при исходных данных: $p_{\infty} = 0.658 \times 10^4$ эрг/см³ ($p_{\infty} = 5$ Тор), $\rho_{\infty} = 0.918 \times 10^{-5}$ г/см³, $T_{\infty} = 250$ К, $V_{\infty} = 1.576 \times 10^5$ см/с ($M = 5$), $\varepsilon = 1500$ В, $R_0 = 12$ кОм, $B_z = -0.3$ Тл

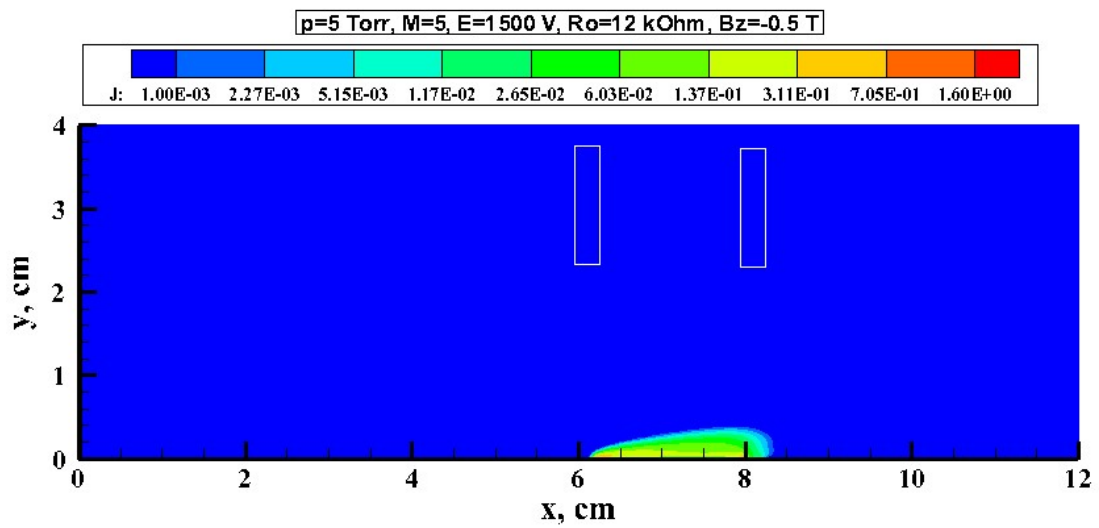
- а) концентрация заряженных частиц, 10^9 см⁻³;
- б) электрический потенциал, φ/ε ;
- в) плотность электрического тока, А/см²;
- г) температурное поле, К;
- д) давление, Тор;
- е) скорость $V_y, v/V_{\infty}$;
- ж) распределение концентраций заряженных частиц (10^9 см⁻³) и напряженности электрического поля E_y (В/см) вдоль поверхности;
- з) распределение коэффициентов C_p и C_{τ} вдоль поверхности;
- и) распределение критериев St и St_{τ} вдоль поверхности;
- к) распределение компонент магнитной силы вдоль поверхности, дин/см²



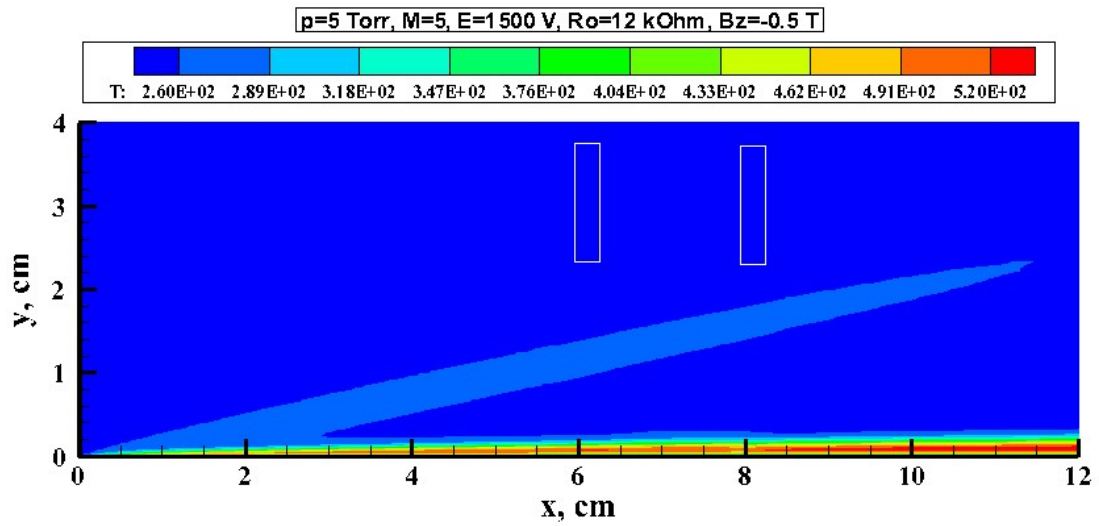
a



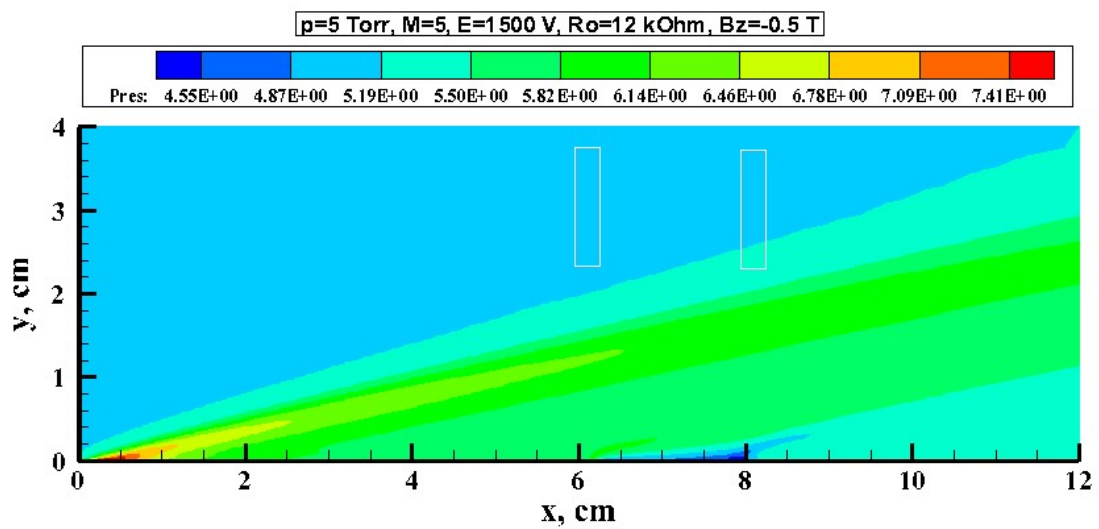
b



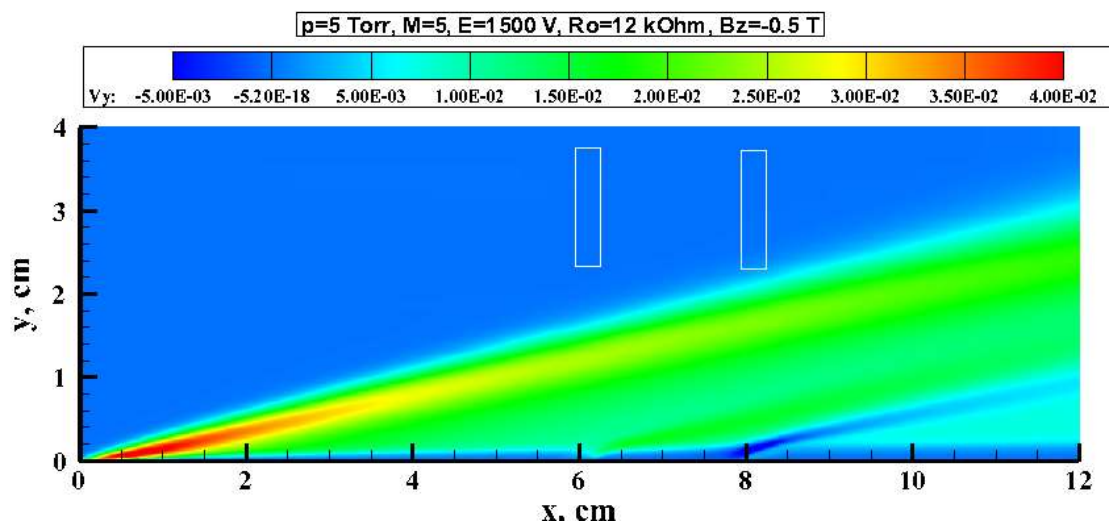
в



z



o



e

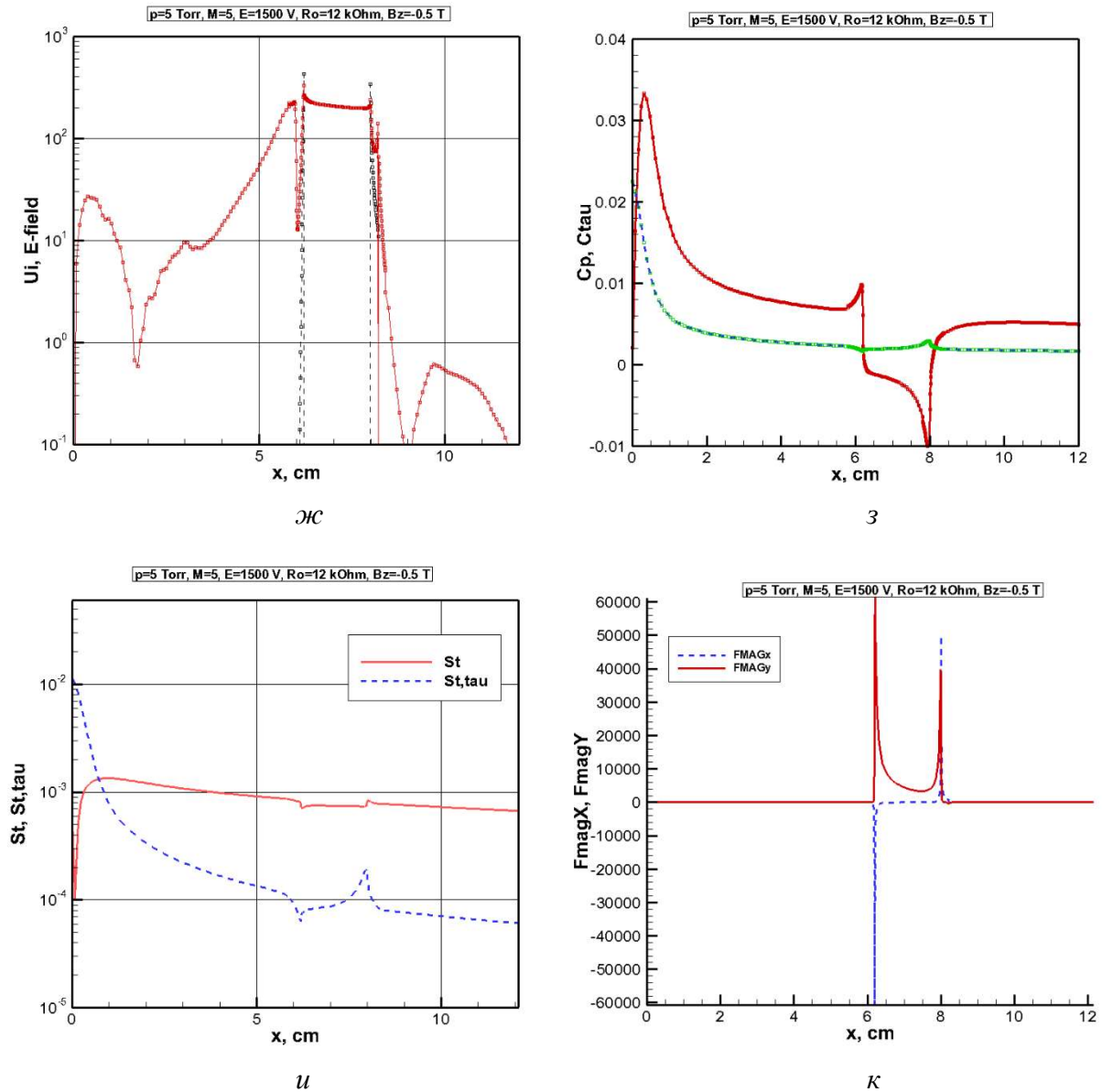
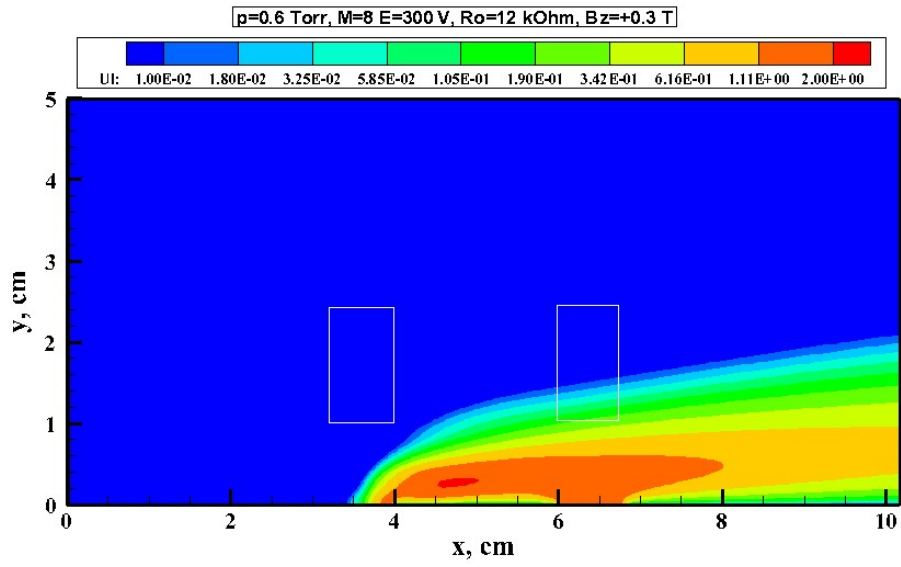
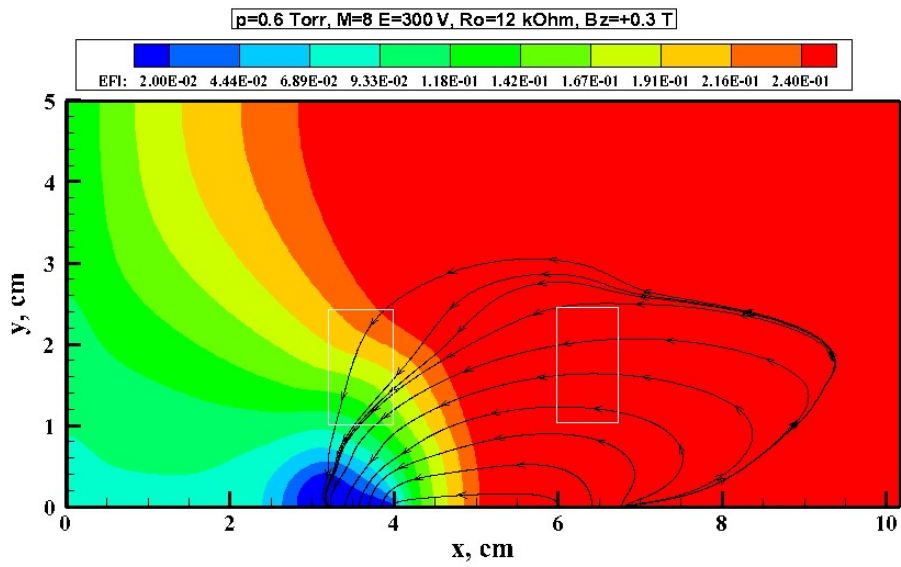


Рис. 19. Аномальный тлеющий разряд между двумя плоскими электродами, расположенными на поверхности обтекаемой пластины при исходных данных: $p_{\infty} = 0.658 \times 10^4$ эрг/см³ ($p_{\infty} = 5$ Тор), $\rho_{\infty} = 0.918 \times 10^{-5}$ г/см³, $T_{\infty} = 250$ К, $V_{\infty} = 1.576 \times 10^5$ см/с ($M = 5$), $\varepsilon = 1500$ В, $R_0 = 12$ кОм, $B_z = -0.5$ Тл

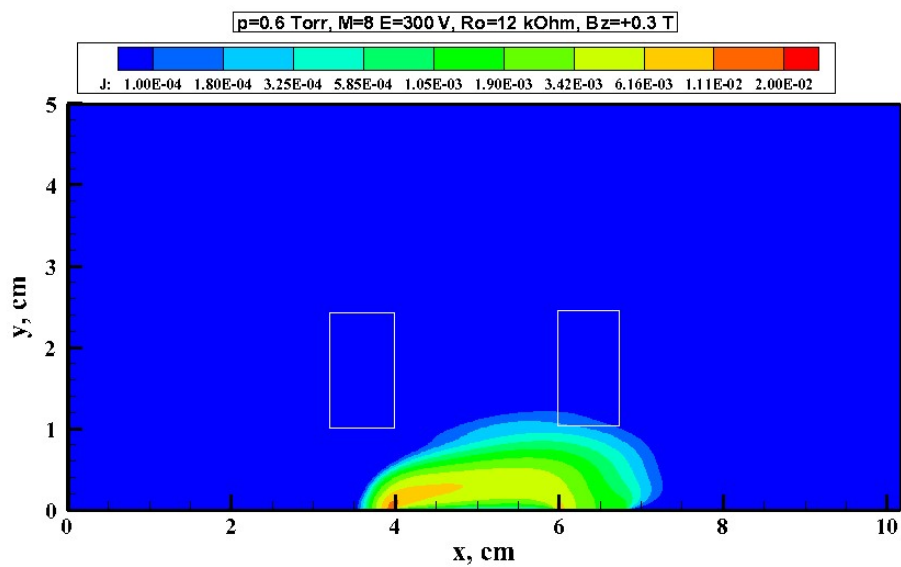
- а) концентрация заряженных частиц, 10^9 см⁻³;
- б) электрический потенциал, φ/ε ;
- в) плотность электрического тока, А/см²;
- г) температурное поле, К;
- д) давление, Тор;
- е) скорость $V_y, v/V_{\infty}$;
- ж) распределение концентраций заряженных частиц (10^9 см⁻³) и напряженности электрического поля E_y (В/см) вдоль поверхности;
- з) распределение коэффициентов C_p и C_t вдоль поверхности;
- и) распределение критериев St и St_{τ} вдоль поверхности;
- к) распределение компонент магнитной силы вдоль поверхности, дин/см²



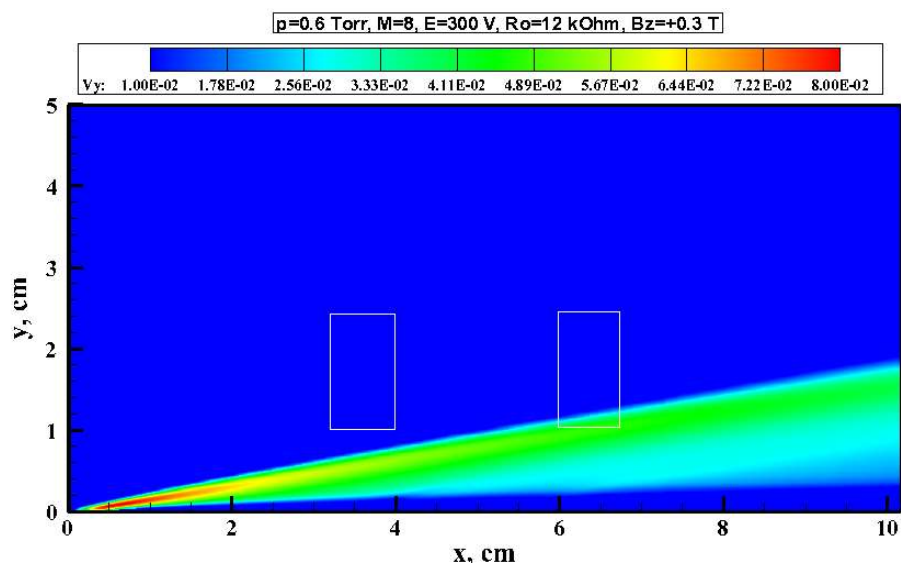
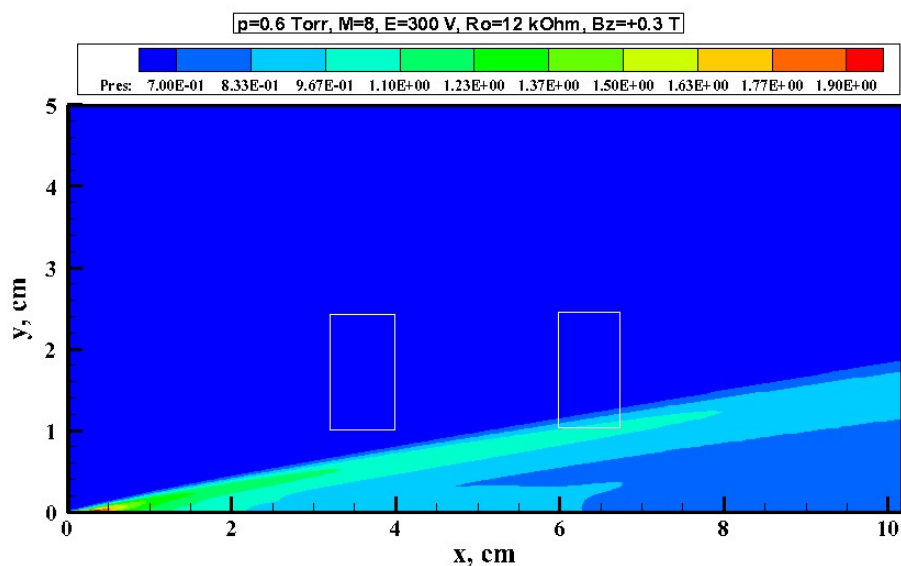
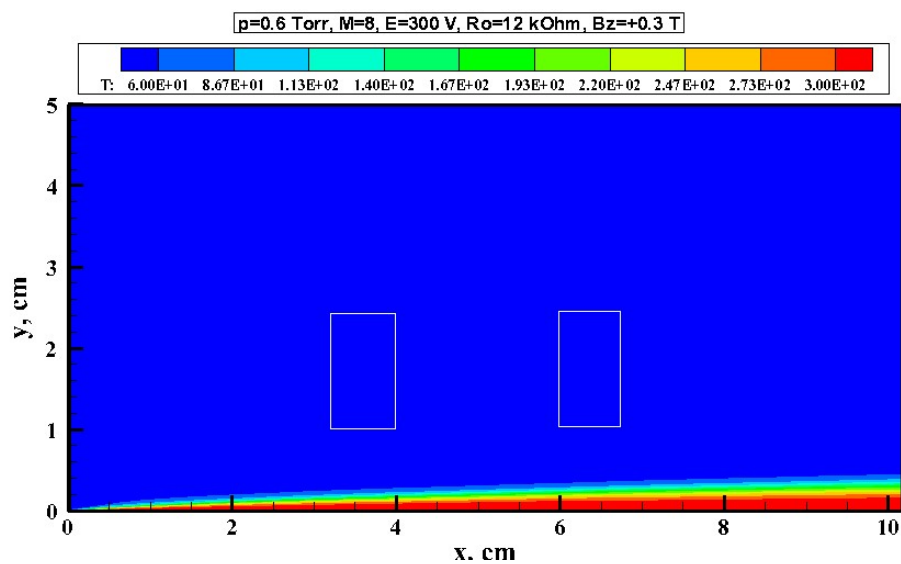
a



b



c



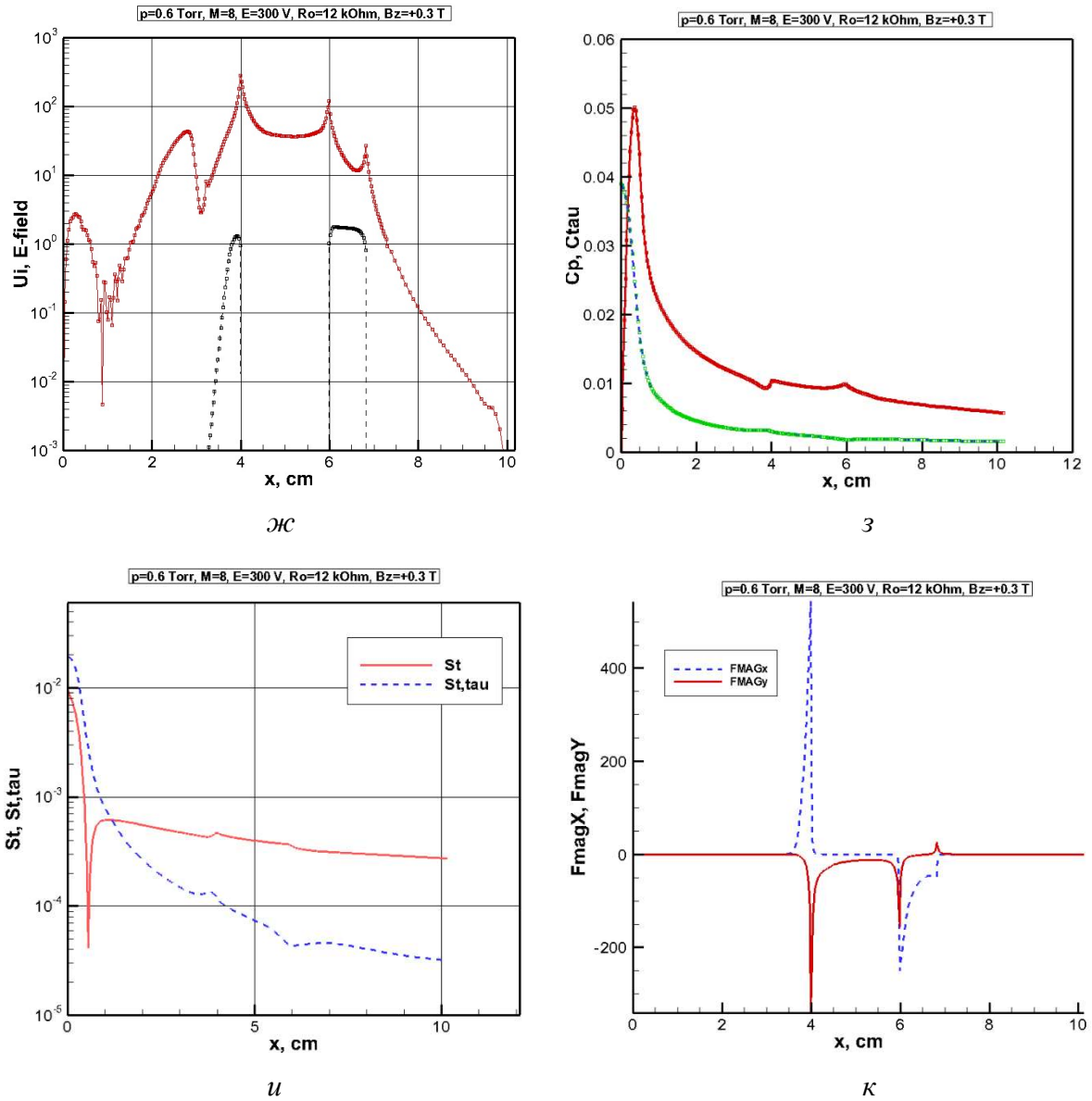
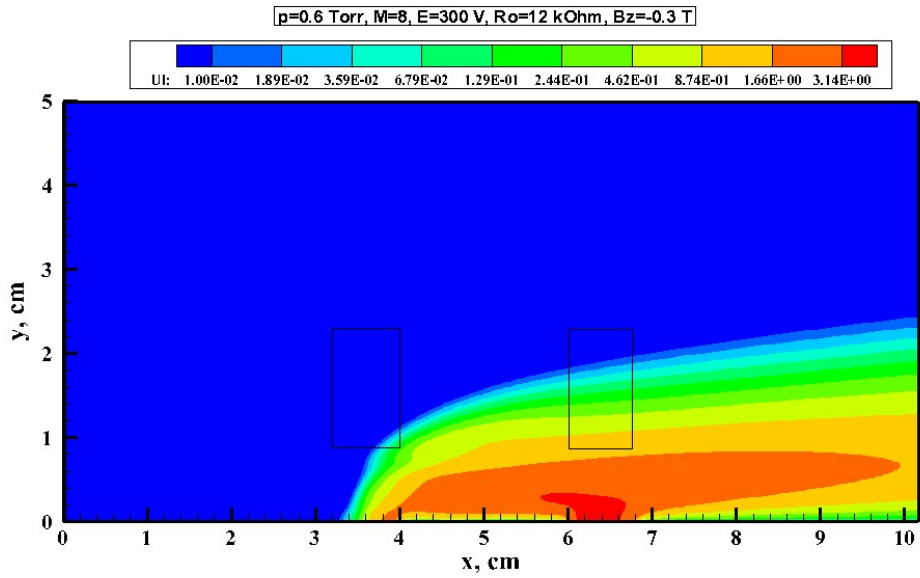
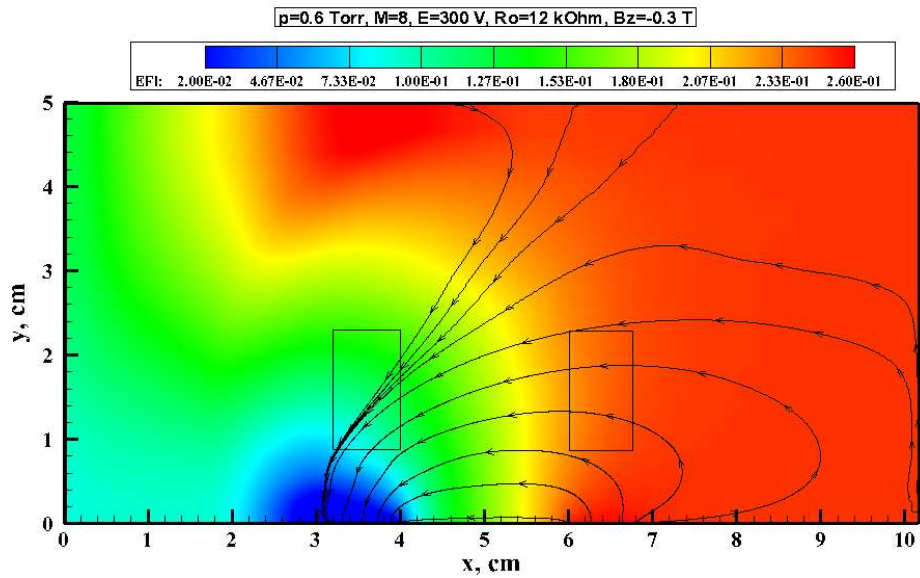


Рис. 20. Аномальный тлеющий разряд между двумя плоскими электродами, расположенными на поверхности обтекаемой пластины при исходных данных: $p_\infty = 0.784 \times 10^3$ эрг/см³ ($p_\infty = 0.6$ Тор), $\rho_\infty = 0.636 \times 10^{-5}$ г/см³, $T_\infty = 41.5$ К, $V_\infty = 1.050 \times 10^5$ см/с ($M = 8$), $\varepsilon = 300$ В, $R_0 = 12$ кОм, $B_z = +0.3$ Тл

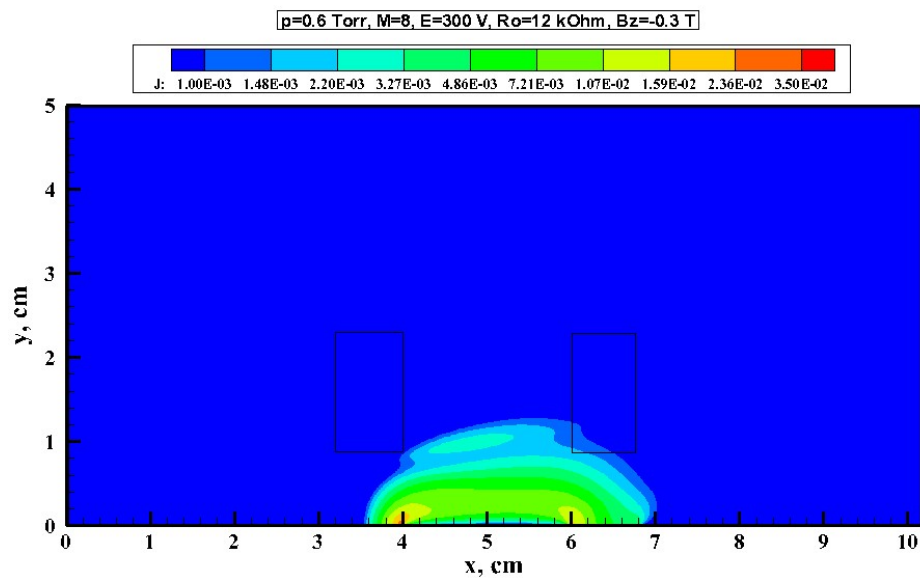
- а) концентрация заряженных частиц, 10^9 см⁻³;
- б) электрический потенциал, φ/ε ;
- в) плотность электрического тока, А/см²;
- г) температурное поле, К;
- д) давление, Тор;
- е) скорость $V_y, v/V_\infty$;
- ж) распределение концентраций заряженных частиц (10^9 см⁻³) и напряженности электрического поля E_y (В/см) вдоль поверхности;
- з) распределение коэффициентов C_p и C_τ вдоль поверхности;
- и) распределение критериев St и St_τ вдоль поверхности;
- к) распределение компонент магнитной силы вдоль поверхности, дин/см²



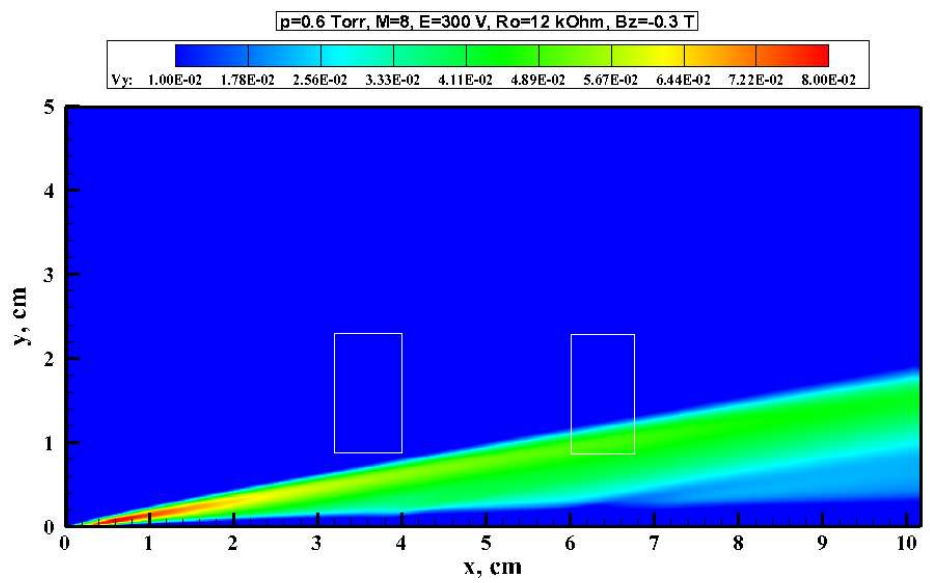
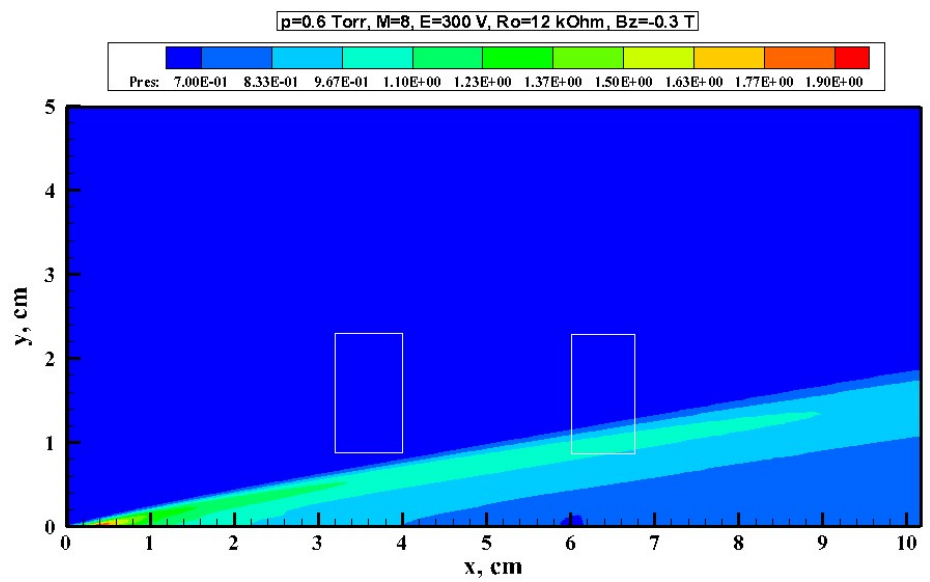
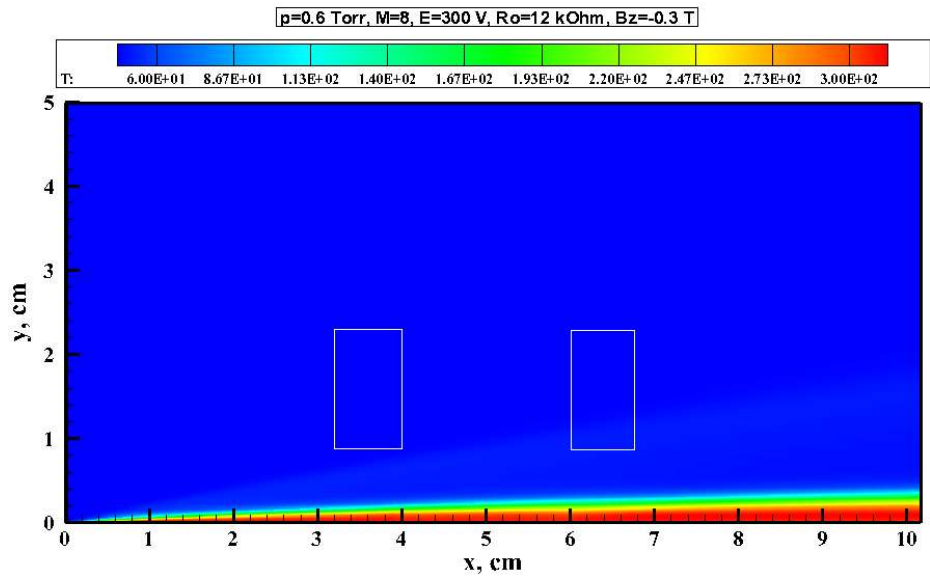
a



b



b



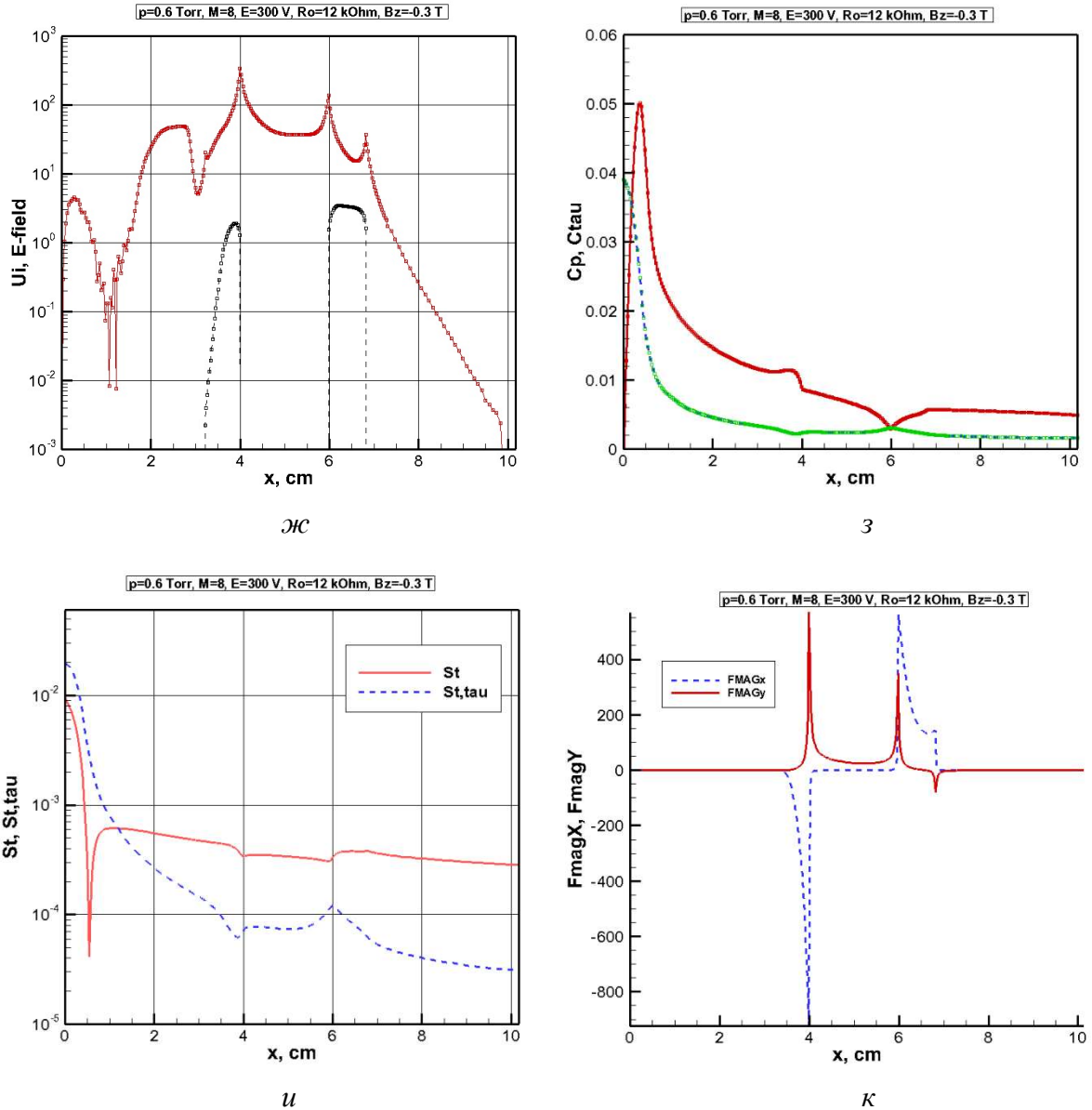


Рис. 21. Аномальный тлеющий разряд между двумя плоскими электродами, расположенными на поверхности обтекаемой пластины при исходных данных: $p_{\infty} = 0.784 \times 10^3$ эрг/см³ ($p_{\infty} = 0.6$ Тор), $\rho_{\infty} = 0.636 \times 10^{-5}$ г/см³, $T_{\infty} = 41.5$ К, $V_{\infty} = 1.050 \times 10^5$ см/с ($M = 8$), $\varepsilon = 300$ В, $R_0 = 12$ кОм, $B_z = -0.3$ Тл

- а) концентрация заряженных частиц, 10^9 см⁻³;
- б) электрический потенциал, φ/ε ;
- в) плотность электрического тока, А/см²;
- г) температурное поле, К;
- д) давление, Тор;
- е) скорость $V_y, v/V_{\infty}$;
- ж) распределение концентраций заряженных частиц (10^9 см⁻³) и напряженности электрического поля E_y (В/см) вдоль поверхности;
- з) распределение коэффициентов C_p и C_t вдоль поверхности;
- и) распределение критериев St и St_{τ} вдоль поверхности;
- к) распределение компонент магнитной силы вдоль поверхности, дин/см²

Таблица 1

Исходные данные расчетных вариантов и интегральные электродинамические параметры разряда

Рис.	p_{∞} , Тор	ρ_{∞} , 10^{-5} г/см ³	T_{∞} , К	М	ε , В	R_0 , кОм	B_z , Тл	V_g , В	I_c , мА	W_c , см	x_{C1}/x_{C2}	x_{A1}/x_{A2}
2	0.6	0.636	41.5	5	150	12	+0.1	80	0.005	3	6/6.2	8/8.2
3							+0.3	80	0.005	3	6/6.2	8/8.2
4							-0.1	56	0.012	3	6/6.2	8/8.2
5							-0.3	44	0.010	3	6/6.2	8/8.2
6	0.6	0.636	41.5	5	200	12	+0.1	57	0.012	3	6/6.2	8/8.2
7							+0.3	57	0.012	3	6/6.2	8/8.2
8							-0.1	57	0.012	3	6/6.2	8/8.2
9							-0.3	55	0.012	3	6/6.2	8/8.2
10	0.6	0.636	41.5	5	300	12	+0.1	77	0.019	3	6/6.2	8/8.2
11							+0.3	77	0.019	3	6/6.2	8/8.2
12							-0.1	77	0.019	3	6/6.2	8/8.2
13							-0.3	77	0.019	3	6/6.2	8/8.2
14	5.0		296	5	700	300	+0.5	275	0.0014	1	6/7	9/10
15							-0.5	320	0.0013	1	6/7	9/10
16	5.0		296	5	1500	12	+0.3	411	0.09	6.4	6/6.2	8/8.2
17							+0.5	411	0.09	6.4	6/6.2	8/8.2
18							-0.3	395	0.09	6.4	6/6.2	8/8.2
19							-0.5	384	0.09	6.4	6/6.2	8/8.2
20	0.6	0.636	41.5	8	300	12	+0.3	129	0.031	6.4	3.2/4	8/8.2
21							-0.3	114	0.015	6.4	3.2/4	6/6.8

Статья поступила в редакцию 12 октября 2022 г.