

ЗАВИСИМОСТЬ СТАЦИОНАРНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ ТОНКОГО ТОКОВОГО СЛОЯ С ПОСТОЯННОЙ НОРМАЛЬНОЙ КОМПОНЕНТОЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ОТ ВНЕШНИХ ПАРАМЕТРОВ

О. В. Мингалев¹, И. В. Мингалев¹, Х. В. Малова^{2,3},
М. Н. Мельник¹, Л. М. Зеленый²

1. Полярный геофизический институт Кольского научного центра РАН
2. Институт космических исследований РАН
3. Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скobel'цина МГУ

При помощи численной модели тонкого токового слоя (ТТС) в хвосте магнитосферы, основанной на методе крупных частиц, исследуется зависимость квазистационарных конфигураций ТТС от значений двух входных параметров модели: отношения $B_z / \Delta B_x$ и отношения $B_y^E / \Delta B_x$ соответственно заданной постоянной нормальной компоненты магнитного поля B_z и внешней постоянной сдвиговой компоненты B_y^E к изменению в слое тангенциальной компоненты $B_x(z)$.

Модель имеет размерность 1D3V, в ней учитываются только протоны, а электроны рассматриваются как холодный нейтрализующий фон. Используется система координат де Хоффмана-Теллера, что позволяет исключить электрическое поле. Магнитное поле и ток имеют вид:

$$\mathbf{B} = B_x(z) \mathbf{e}_x + B_y(z) \mathbf{e}_y + B_z \mathbf{e}_z, \quad \mathbf{j} = j_x(z) \mathbf{e}_x + j_y(z) \mathbf{e}_y. \quad (1)$$

Вне слоя в долях хвоста магнитное поле считается постоянным:

$$\left. \begin{array}{l} \mathbf{B} \\ \mathbf{B} \end{array} \right|_{\begin{array}{l} z > L \\ z < -L \end{array}} = \left. \begin{array}{l} B_x(L) \mathbf{e}_x + B_y^E \mathbf{e}_y + B_z \mathbf{e}_z, \\ B_x(-L) \mathbf{e}_x + B_y^E \mathbf{e}_y + B_z \mathbf{e}_z \end{array} \right\} \quad (2)$$

(здесь \mathbf{e}_x , \mathbf{e}_y , \mathbf{e}_z — единичные базисные векторы системы координат GSM). Токовый слой образуется двумя встречными потоками плазмы, которые набегают из долей хвоста вдоль силовых линий магнитного поля с гидродинамической скоростью величиной V_D и имеют максвелловское распределение с температурой протонов T_{pg} :

$$\left. \begin{aligned} f_{\pm}(z, \mathbf{v}) &= \frac{n_{\pm}}{\left(V_{T0}\sqrt{2\pi}\right)^3} \exp\left\{-\frac{|\mathbf{v} - \mathbf{U}(z)|^2}{2V_{T0}^2}\right\}, \quad \text{где} \\ \mathbf{U}(z) &= -\frac{z}{|z|} V_D \mathbf{b}(z), \quad V_{T0} = \sqrt{\frac{eT_{pg}}{m_p}}, \quad \mathbf{b}(z) = \frac{\mathbf{B}(z)}{|\mathbf{B}(z)|} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

есть, соответственно, гидродинамическая скорость в источнике, тепловая скорость протонов в источнике, и единичный вектор вдоль магнитного поля. Знак (+) соответствует верхнему (северному) источнику, знак (-) — нижнему (южному).

Условия силового баланса вдоль осей X , Y и Z имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \Pi_{x,z}(z) - \frac{1}{\mu_0} B_z B_x(z) &= const, \\ \Pi_{y,z}(z) - \frac{1}{\mu_0} B_z B_y(z) &= const, \\ \Pi_{z,z}(z) + \frac{1}{2\mu_0} (|B_x(z)|^2 + |B_y(z)|^2) &= const, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где компоненты тензора напряжений $\Pi_{i,k}(z)$ определяются формулами

$$\Pi_{i,k}(z) = m_p \int_{\mathbb{R}^3} v_i v_k f(z, \mathbf{v}) d^3 \mathbf{v}.$$

Из условия баланса по оси Z вытекает граничное условие для компоненты $B_x(z)$:

$$B_x(\pm L) = \mu_0 \frac{\Delta \Pi_{z,z}}{\Delta B_x} \pm \frac{1}{2} \Delta B_x, \quad (5)$$

где $\Delta \Pi_{z,z} = \Pi_{z,z}(L) - \Pi_{z,z}(-L)$, $\Delta B_x = B_x(L) - B_x(-L)$.

В ходе расчетов методом трассирования крупных частиц совместно решается стационарное 1D3V уравнение Власова для протонов

$$v_z \frac{\partial f}{\partial z} + \frac{e}{m_p} \left([\mathbf{v} \times \mathbf{B}] \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} \right) = 0, \quad (6)$$

и уравнение Ампера для магнитного поля $\text{rot } \mathbf{B}(z) = \mu_0 \mathbf{j}(z)$, которое дает два скалярных уравнения

$$\frac{dB_x(z)}{dz} = \mu_0 j_y(z), \quad \frac{dB_y(z)}{dz} = -\mu_0 j_x(z), \quad (7)$$

и вместе с граничными условиями (2) и (5) определяет магнитное поле. Плотность тока определяется формулой

$$\mathbf{j}(z) = e \int_{\mathbb{R}^3} \mathbf{v} f(z, \mathbf{v}) d^3 \mathbf{v}.$$

Отношение концентраций в источниках n_+ / n_- однозначно определяется из условия пространственной 1-мерности модели

$$j_z(z) = e \int_{\mathbb{R}^3} v_z f(z, \mathbf{v}) d^3 \mathbf{v} \equiv 0, \quad (8)$$

а их значения n_\pm однозначно определяются изменением в слое тангенциальной компоненты магнитного поля $\Delta B_x = B_x(L) - B_x(-L)$.

Входными параметрами модели являются:

- 1) z -компоненты магнитного поля B_z ;
- 2) внешняя заданная часть y -компоненты магнитного поля B_y^E ;
- 3) температура протонов в потоках плазмы из источников в долях хвоста T_{pg} (определяет тепловую скорость $V_{T0} = \sqrt{eT_{pg}/m_p}$)
- 4) величина V_D гидродинамической скорости потока плазмы из источников (определяется параметром $\varepsilon = V_{T0}/V_D$);
- 5) величина изменения в слое x -компоненты магнитного поля ΔB_x ;
- 6) шаг пространственной сетки h и шаг по времени τ ;
- 7) полуширина области расчета магнитного поля L , положение источников $|z| = L_s$, полуширина области контроля частиц L_c .

В ходе моделирования в слое рассчитываются концентрация $n(z)$, компоненты плотности тока протонов $j(z)$, самосогласованные компоненты магнитного поля $B_x(z)$ и $B_y(z)$, а также компоненты тензора напряжений $\Pi_{i,k}(z)$. Для контроля системы вычисляются компоненты тензора давления $P_{i,k}(z)$ и тензора температуры $T_{i,k}(z)$, которые определяются формулами

$$P_{i,k}(z) = \Pi_{i,k}(z) - \frac{j_i(z) j_k(z)}{e^2 n(z)}, \quad T_{i,k}(z) = \frac{P_{i,k}(z)}{en(z)}.$$

По ним вычисляются собственные числа этих тензоров, которые за-
нумеруем в порядке возрастания и обозначим как:

$$P_1(z) \leq P_2(z) \leq P_3(z), \quad T_1(z) \leq T_2(z) \leq T_3(z).$$

Также вычисляются продольное давление $P_{\parallel}(z)$ и продольная тем-
пература $T_{\parallel}(z)$.

Расчеты стартовали от плоской равновесной конфигурации ТТС с
заданной постоянной нормальной компонентой магнитного поля B_z
и самосогласованной тангенциальной компонентой $B_x(z)$, то есть
магнитное поле и ток имели вид

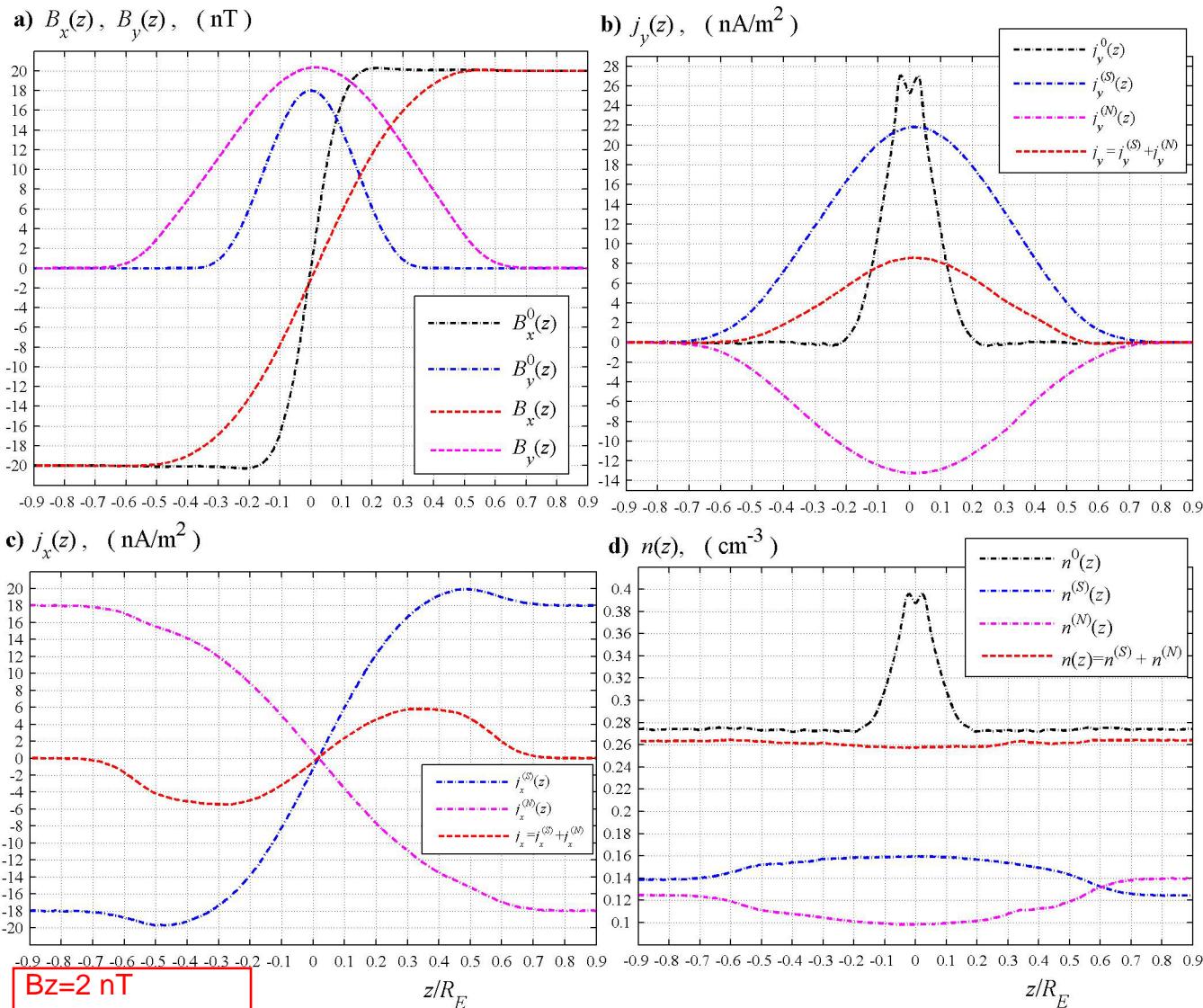
$$\mathbf{B} = B_x(z) \mathbf{e}_x + B_z \mathbf{e}_z, \quad \mathbf{j} = j_y(z) \mathbf{e}_y.$$

В таких конфигурациях компонента плотности тока $j_x(z)$ и соот-
ветствующая ей сдвиговая компонента магнитного поля $B_y(z)$ полу-
чаются очень малыми по сравнению с амплитудами соответственно
 $j_y(z)$ и $B_x(z)$, и не учитываются.

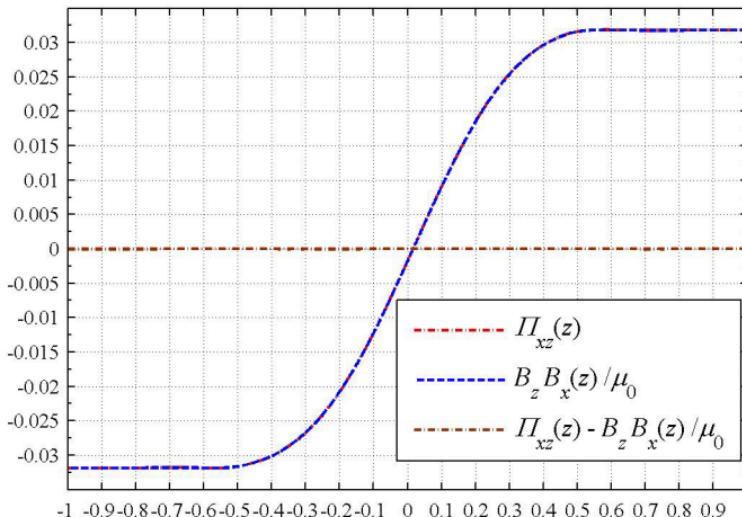
Были проверены следующие варианты.

- 1) Начинался учет только собственных самосогласованных компонент $j_x(z)$ и $B_y(z)$ без дополнительного начального возмущения, то есть магнитное поле и плотность тока начинали рассматриваться в форме (1).
- 2) Дополнительно к указанному в пункте выше накладывалось финитное (локализованное по пространству) колоколообразное возмущение сдвиговой компоненты $B_y^0(z)$ с амплитудой B_y^a . Рассматривались случаи $B_z = 1, 2, 3, 4 \text{ нТл}$, $B_y^a = 2, \dots, 18 \text{ нТл}$.

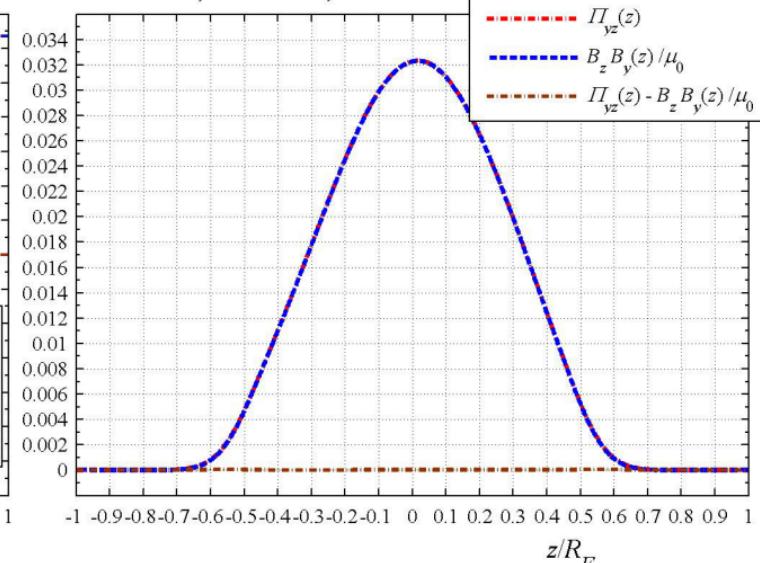
Остальные входные параметры модели имели следующие значения: $B_y^E = 0, 1, 2, 4, 5$, $\Delta B_x = 40 \text{ нТл}$, $T_{pg} = 4 \text{ кэв}$, $V_D = 2V_{T0}$, где тепловая скорость протонов в источнике $V_{T0} = \sqrt{eT_{pg}/m_p} \approx 619 \text{ км/с}$. Область моделирования имеет полуширину $L = R_E$, шаг сетки $h = R_E/640 = 10 \text{ км}$, шаг по времени $\tau = 0.0025 \text{ с}$. Область контроля частиц составляет $\{|z| < L_c = 2.5R_E\}$, источники расположены при $|z| = L_s = 1.6R_E$.



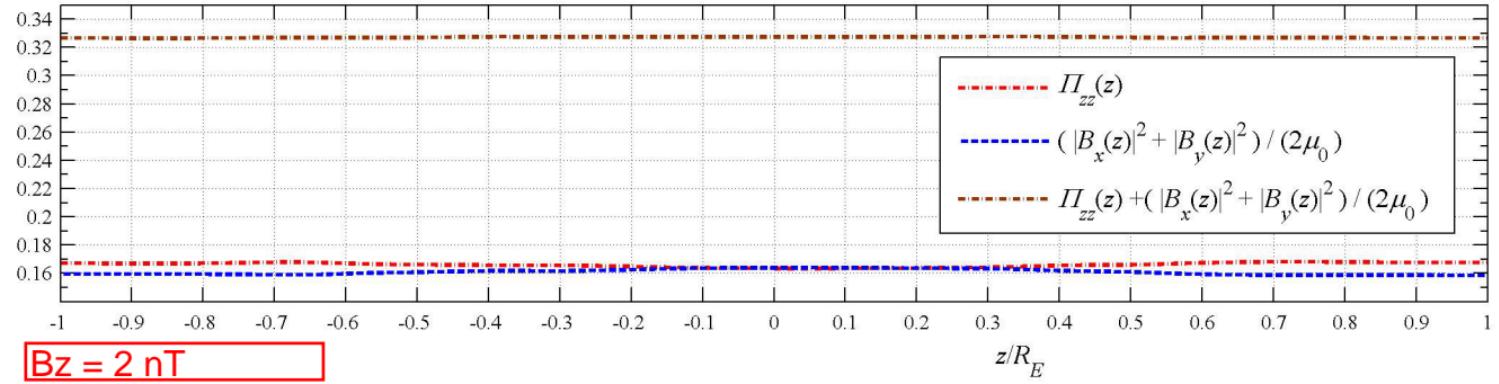
a) (nPa): $\Pi_{xz}(z) - B_z B_x(z) / \mu_0 \approx 0$



b) (nPa): $\Pi_{yz}(z) - B_z B_y(z) / \mu_0 \approx 0$

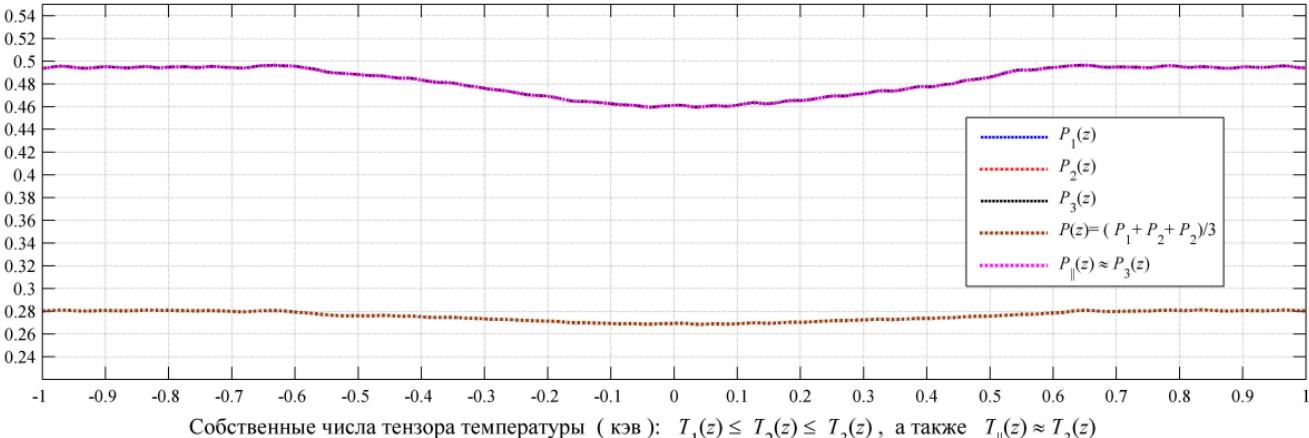


c) (nPa): $\Pi_{zz}(z) + (|B_x(z)|^2 + |B_y(z)|^2) / (2\mu_0) \approx Const$



B_z = 2 nT

Собственные числа тензора давления (нПа): $P_1(z) \leq P_2(z) \leq P_3(z)$, а также $P_{\parallel}(z) \approx P_3(z)$



Собственные числа тензора температуры (кэв): $T_1(z) \leq T_2(z) \leq T_3(z)$, а также $T_{\parallel}(z) \approx T_3(z)$

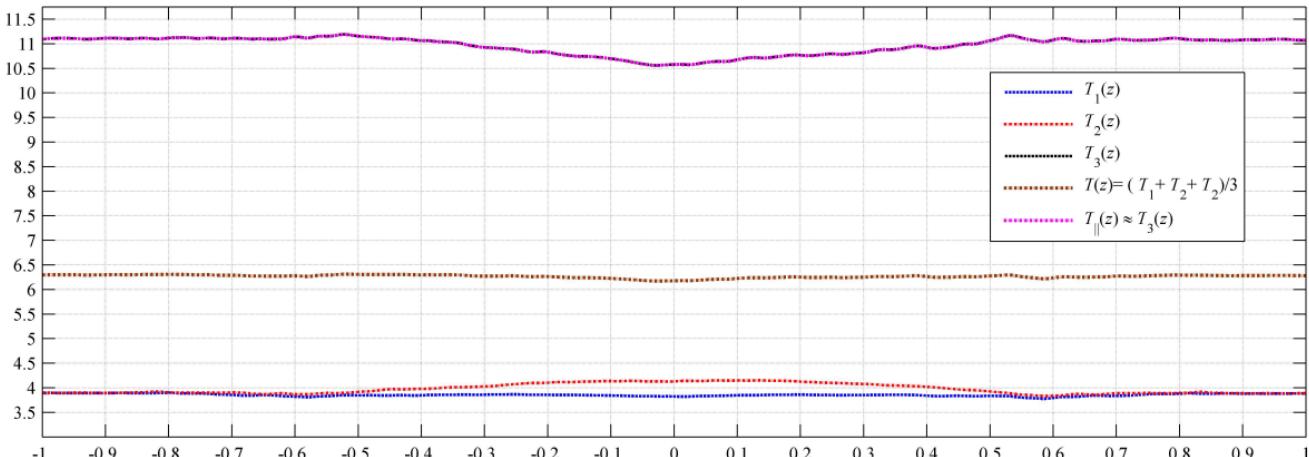
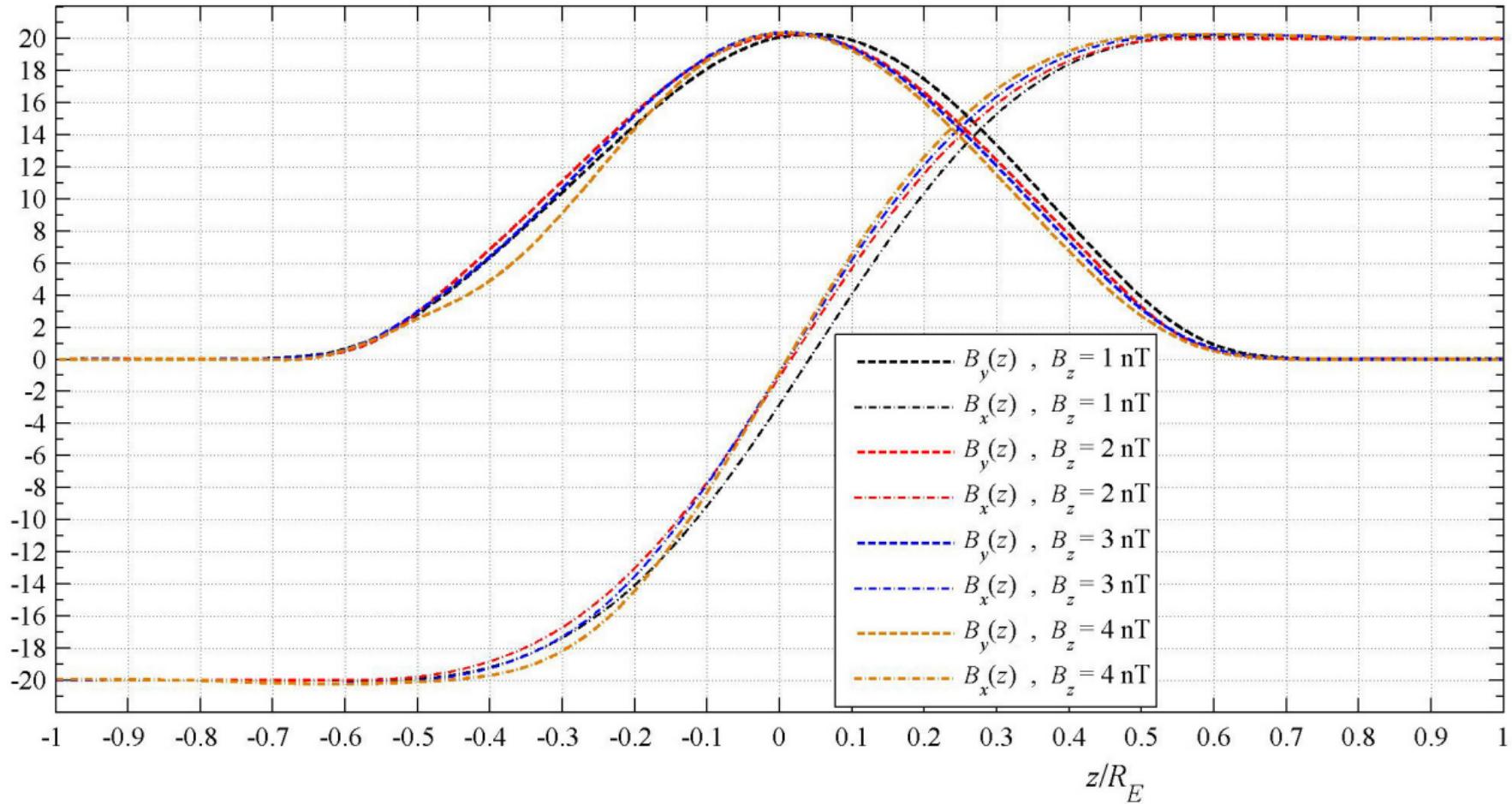
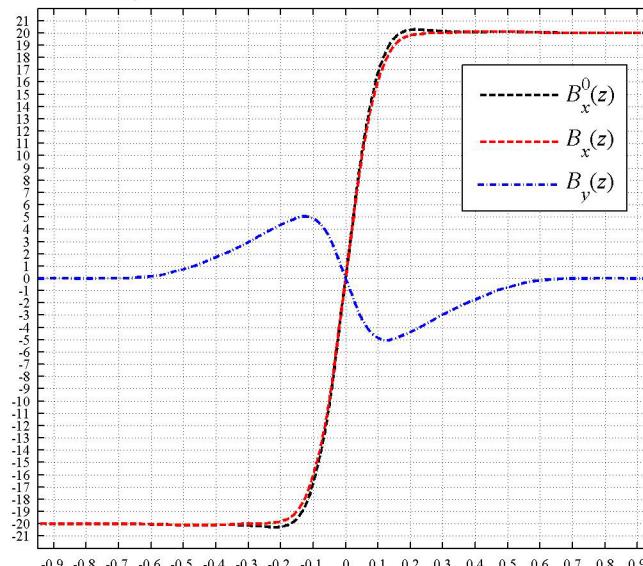
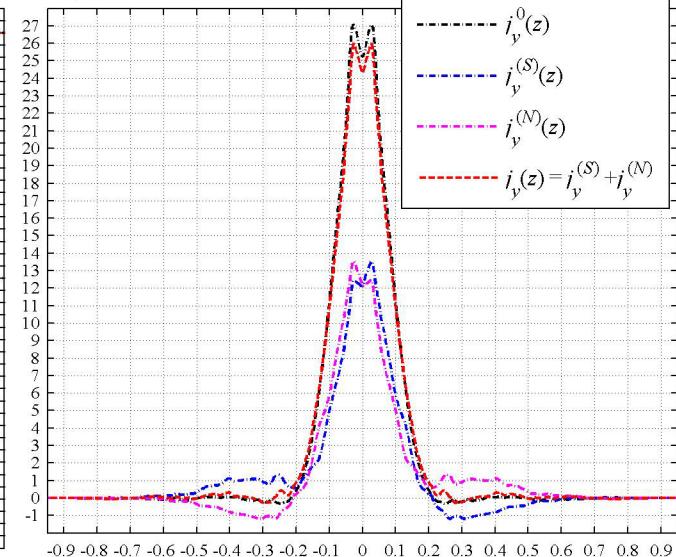
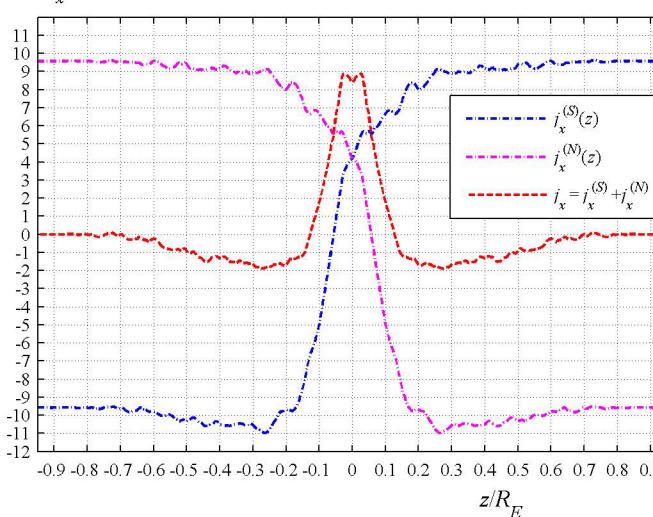
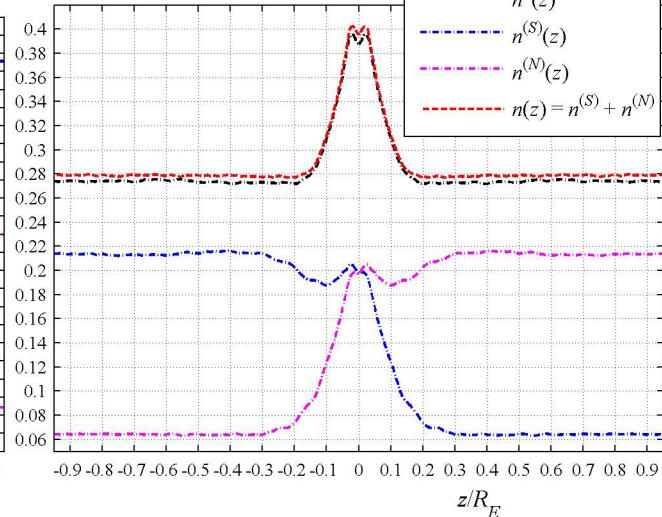
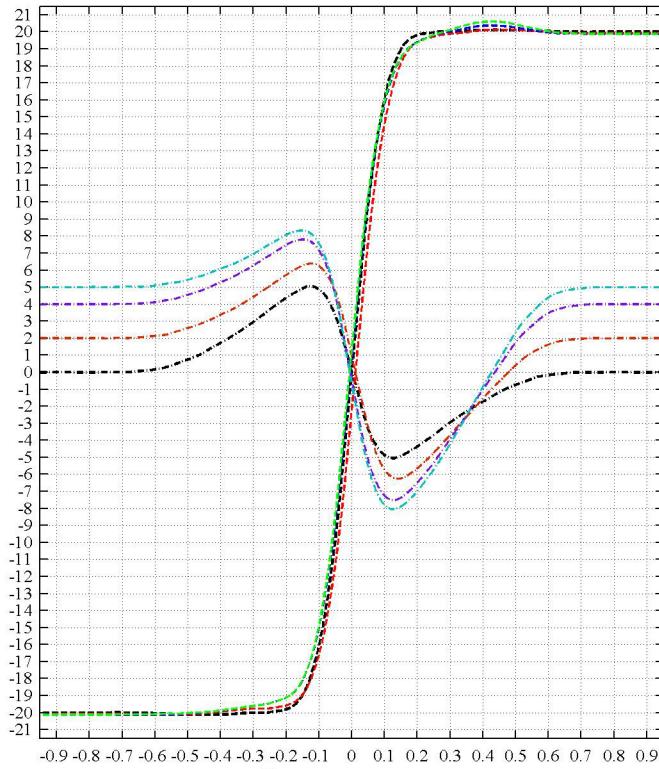
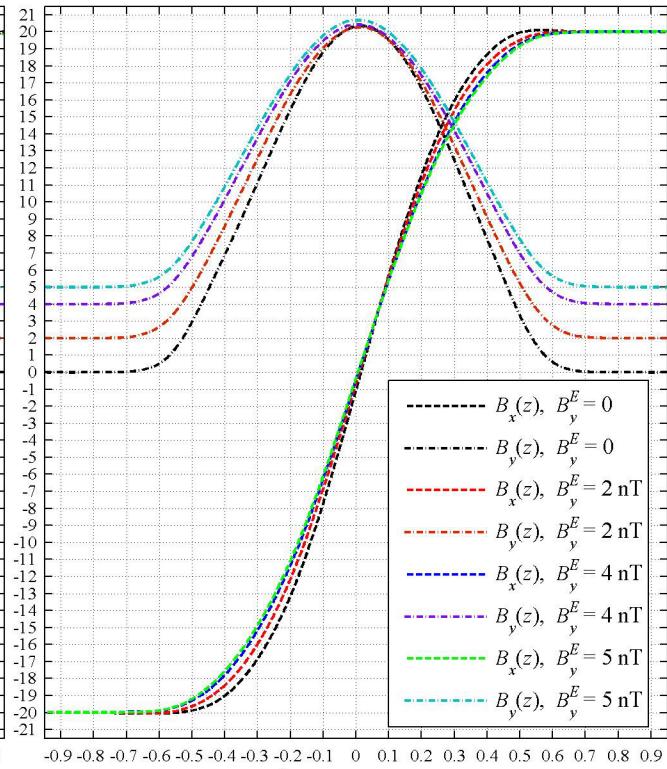
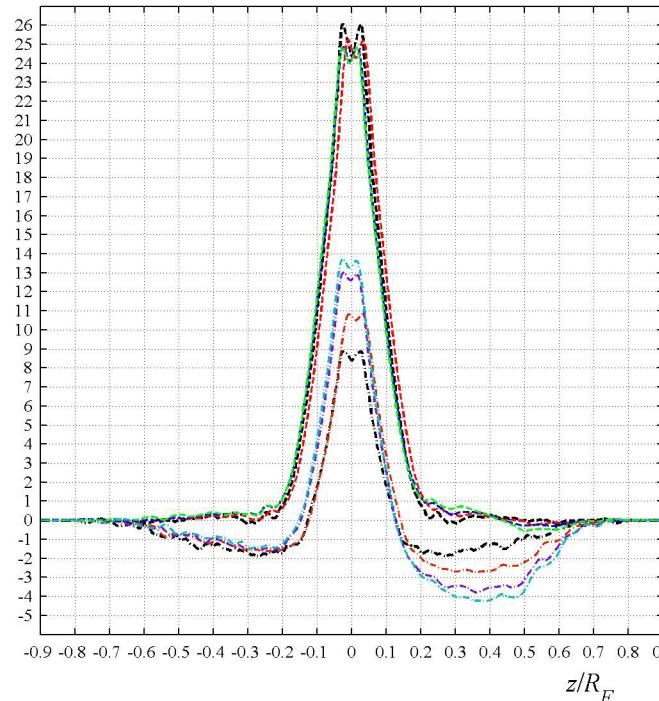
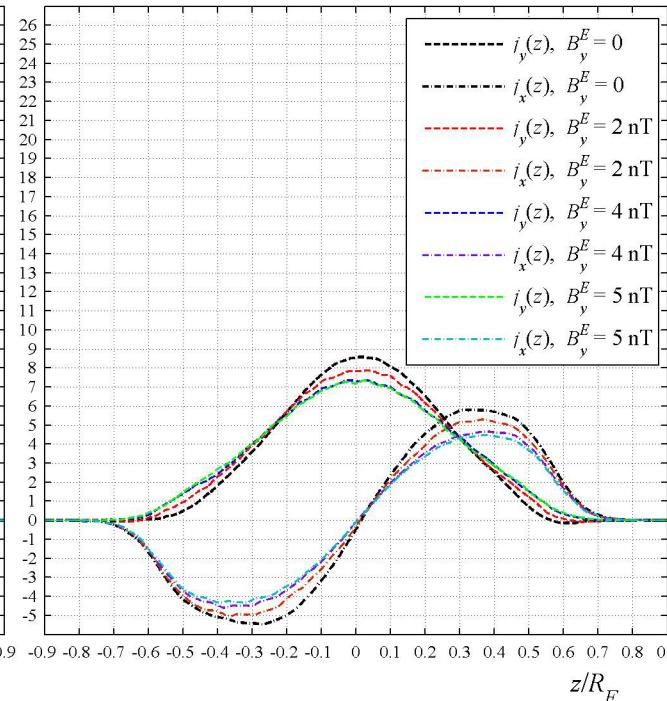


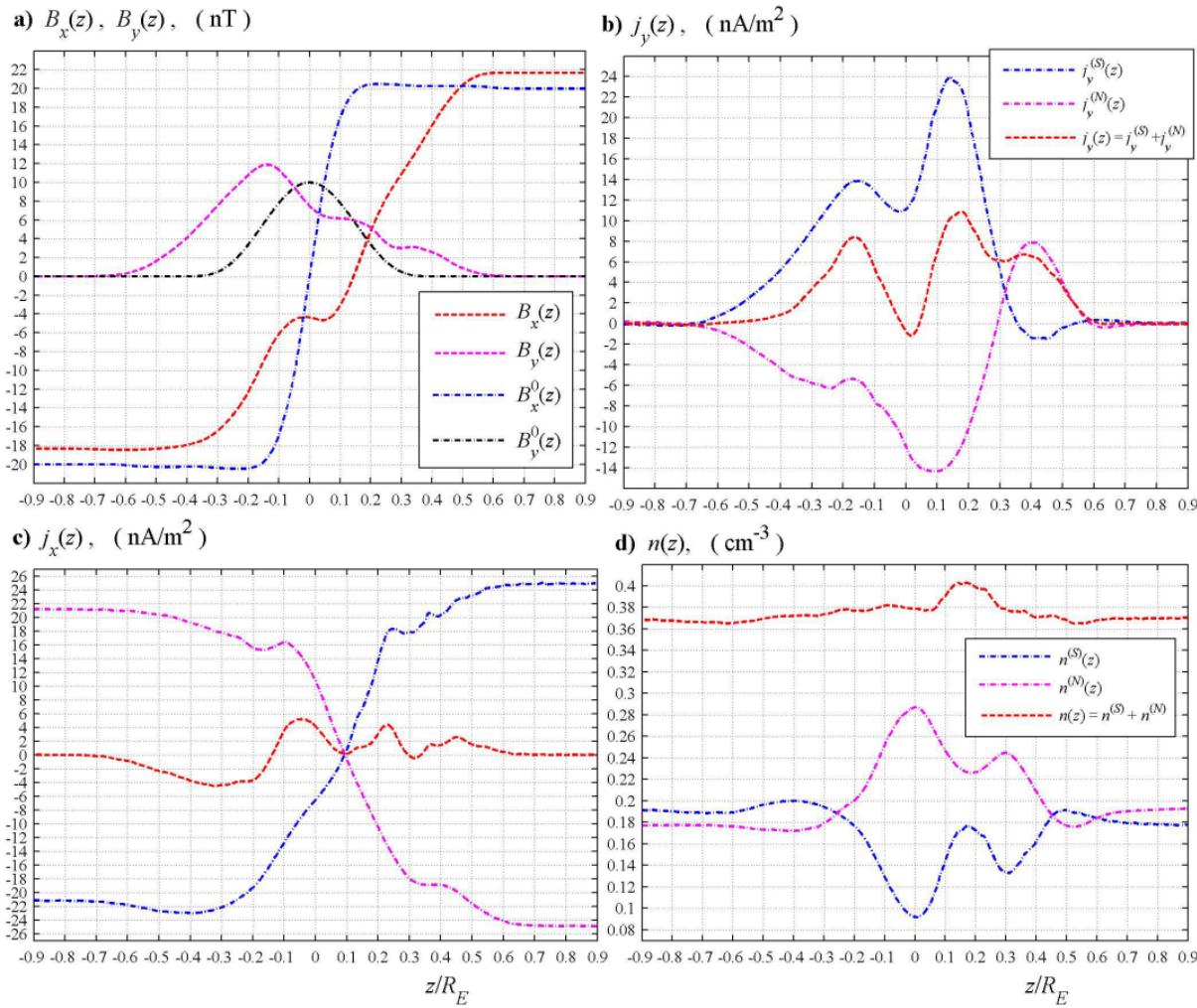
Рис. 11. Давление и температура в ТС с $|B(z)| \approx \text{Const}$ ($B_z = 2 \text{ нТл}$, $\Delta B_x = 40 \text{ нТл}$, $T_{pg} = 4 \text{ кэв}$, $\varepsilon = V_T/V_D = 0.5$) z/R_E

$B_x(z)$, $B_y(z)$ (nT)

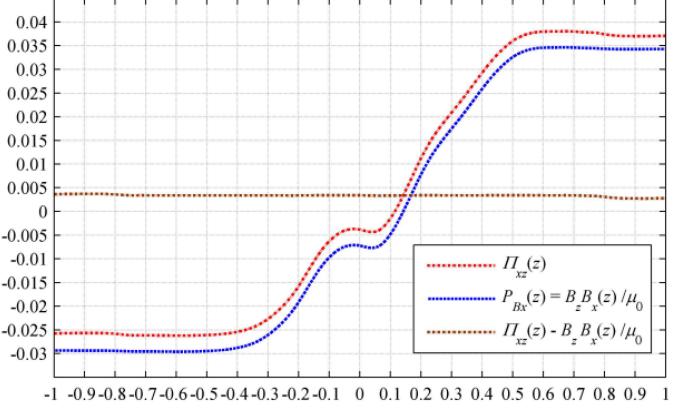


a) $B_x(z)$, $B_y(z)$ (nT)**b) $j_y(z)$, (nA/m²)****c) $j_x(z)$, (nA/m²)****d) $n(z)$, (cm⁻³)**

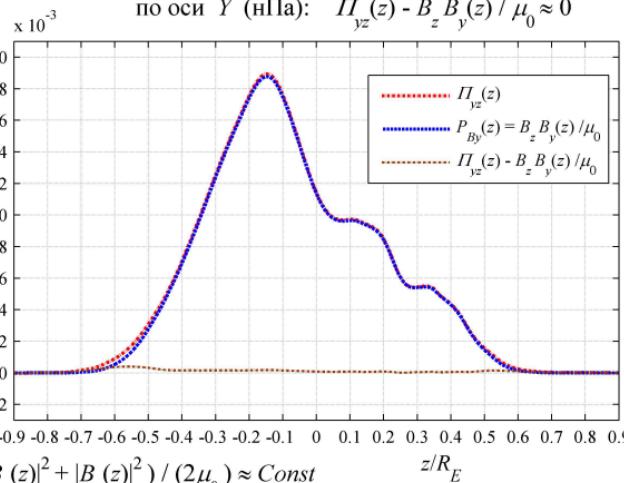
a) $B_x(z)$, $B_y(z)$ (nT)**b) $B_x(z)$, $B_y(z)$ (nT)****c) $j_x(z)$, $j_y(z)$ (nA/m²)****d) $j_x(z)$, $j_y(z)$ (nA/m²)**



Баланс по оси X (нПа): $\Pi_{xz}(z) - B_z B_x(z) / \mu_0 \approx \text{Const}$,



по оси Y (нПа): $\Pi_{yz}(z) - B_z B_y(z) / \mu_0 \approx 0$



Баланс по оси Z (нПа): $\Pi_{zz}(z) + (|B_x(z)|^2 + |B_y(z)|^2) / (2\mu_0) \approx \text{Const}$

$$z/R_E$$

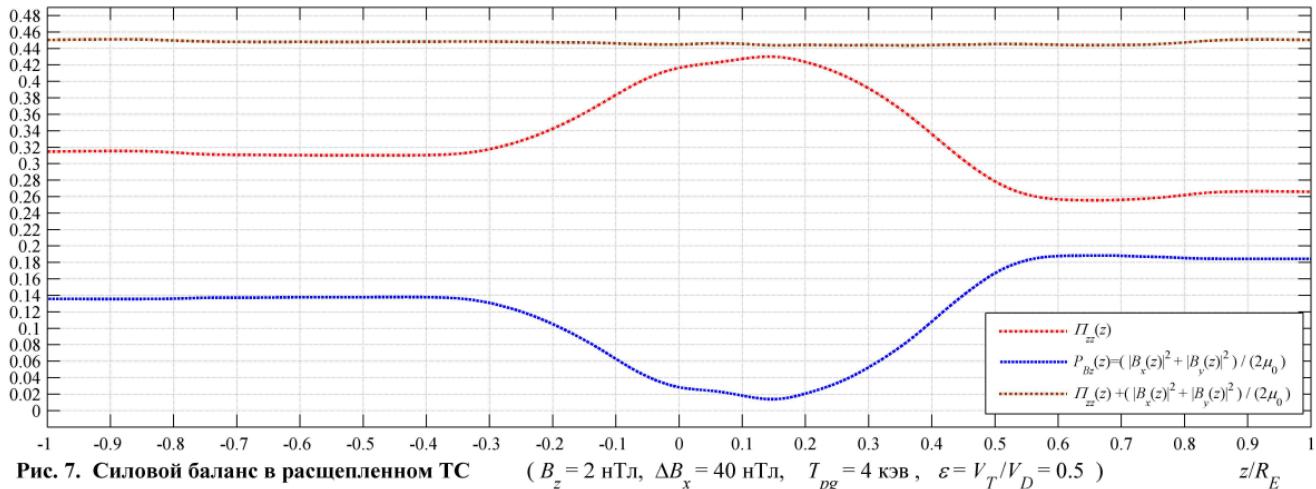
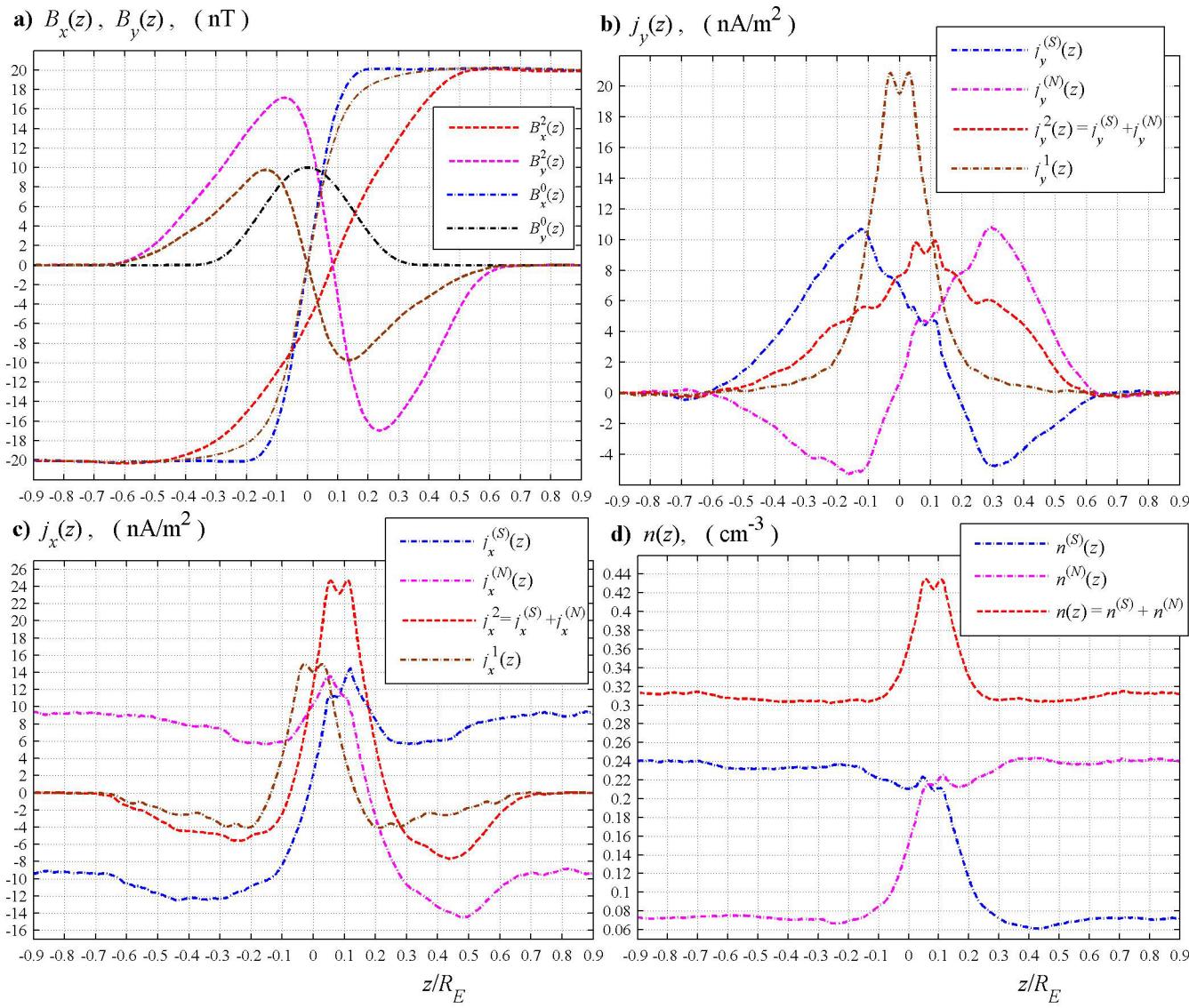


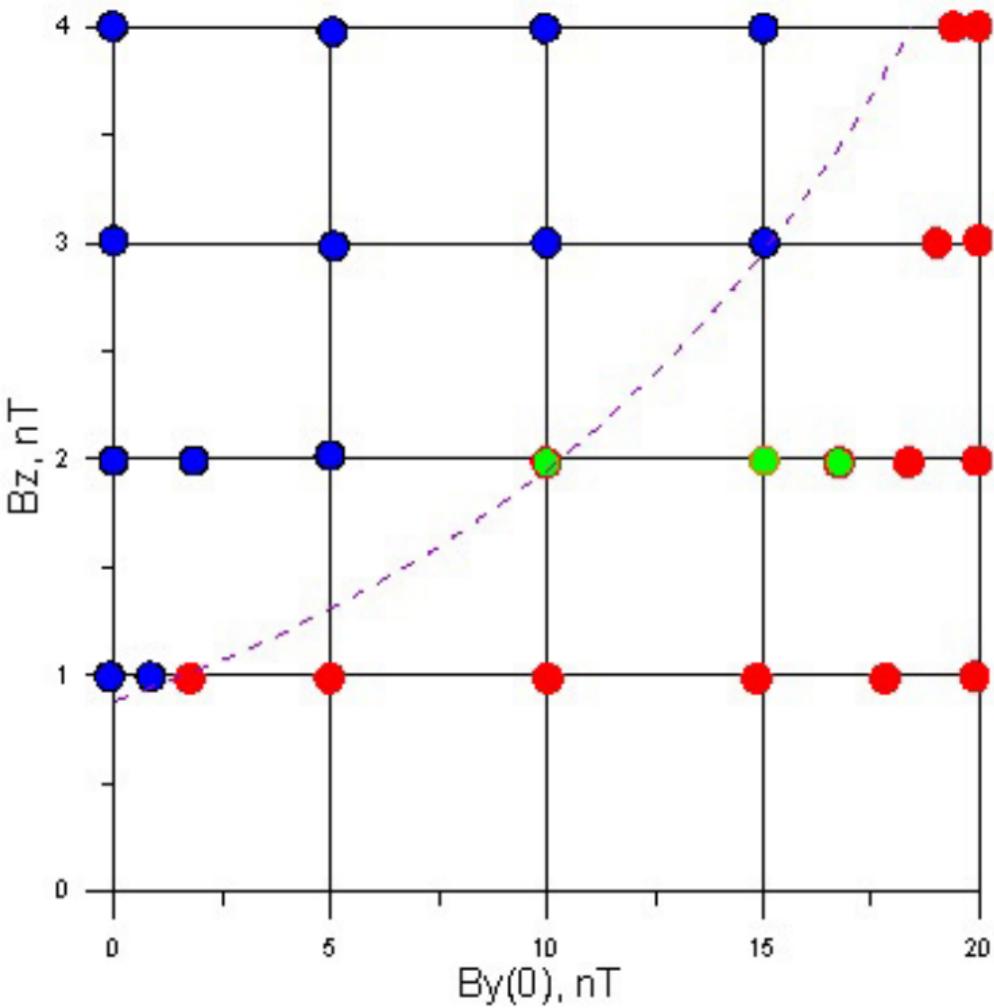
Рис. 7. Силовой баланс в расщепленном ТС

($B_z = 2$ нТл, $\Delta B_x = 40$ нТл, $T_{pg} = 4$ кэВ, $\varepsilon = V_T/V_D = 0.5$)

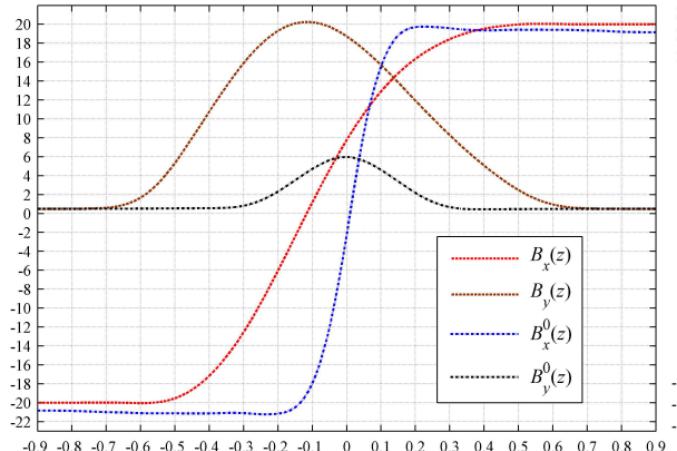
$$z/R_E$$



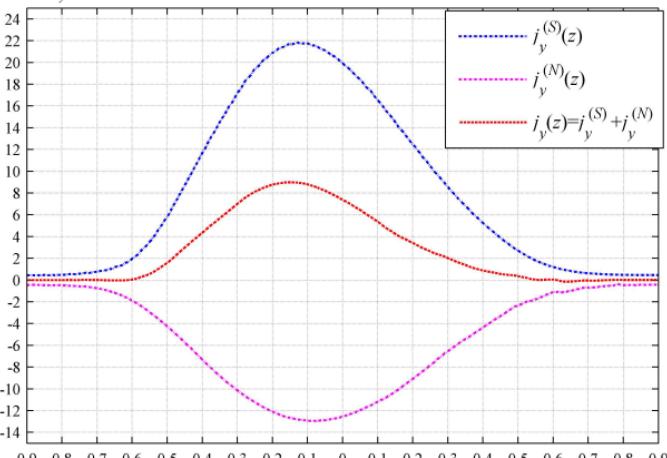
- Symmetrical By
- Antisymmetrical By
- Asymmetrical By



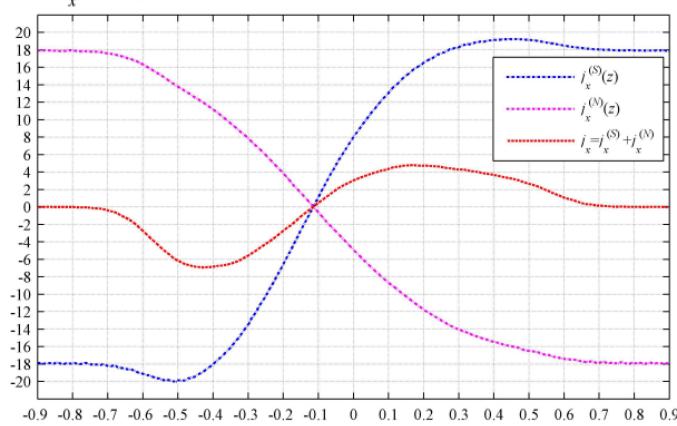
Влияние внешнего $B_y^E = 0.5$ нТл: 1) $B_x(z)$, $B_y(z)$, (нТл)



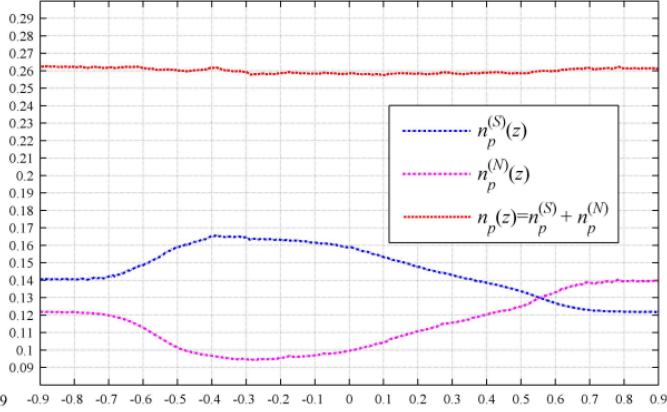
2) $j_y(z)$, (нА/м²)



3) $j_x(z)$, (нА/м²)



4) $n(z)$, (см⁻³)



Токовый слой с $|B(z)| \approx \text{Const}$ при внешнем $B_y^E = 0.5$ нТл z/R_E

$(B_z = 1 \text{ нТл}, \Delta B_x = 40 \text{ нТл}, T_{pg} = 4 \text{ кэВ}, \varepsilon = V_T/V_D = 0.5)$ z/R_E