

На правах рукописи

**Нгуен Суан Тхау**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗМУЩЕННОЙ ЗОНЫ  
ВБЛИЗИ ПЛОСКОГО ЭЛЕКТРОДА В ПОТОКЕ РАЗРЕЖЕННОЙ  
ПЛАЗМЫ**

Специальность 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2013

Работа выполнена на кафедре «Прикладная физика» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Научный руководитель: **Котельников Михаил Вадимович**, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры «Прикладная физика» ФГБОУ ВПО «Московского авиационного института (национального исследовательского университета)» (МАИ)

Официальные оппоненты: **Киреев Владимир Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры высшей математики Московского государственного горного университета (МГГУ).

**Рябый Валентин Анатольевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник лаборатории ВЧ ионных двигателей Московского авиационного института (национального исследовательского университета) (МАИ)

Ведущая организация: Московский государственный университет приборостроения и информатики.

Защита состоится «13» декабря 2013 года в 10 часов на заседании диссертационного совета Д212.125.14 при ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Отзыв на автореферат, заверенный печатью организации, просим направлять по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

Автореферат разослан «    »                      2013г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук, доцент

**Гидаспов В. Ю.**

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность темы:** Орбитальные космические станции, спутники связи и т.д. широко используются в ряде стран в научных, коммерческих и др. интересах. Взаимодействие космического тела с окружающей ионосферной плазмой, с другими космическими телами является актуальной задачей. Исследуемый в диссертации плоский электрод в потоке разреженной плазмы можно рассматривать как элемент поверхности космического тела, изолированный от остальной его части. Плоский электрод может быть расположен перпендикулярно или параллельно потоку разреженной плазмы. Плоский элемент может находиться в плазме, возмущенной каким-либо космическим телом, или в невозмущенной ионосферной плазме. В данном случае исследуемый плоский элемент также может быть ориентирован как навстречу потоку, так и вдоль потока разреженной плазмы. Систематических исследований возмущенной зоны вблизи плоского ориентированного электрода в потоке разреженной плазмы на кинетическом уровне до настоящего времени не проводилось. Однако такие исследования важны для анализа процессов переноса вблизи плоского электрода, находящегося в потоке разреженной плазмы.

**Целью настоящего исследования является:** разработка математических и численных моделей для расчета возмущенной зоны вблизи плоских электродов с различной ориентацией относительно потока разреженной плазмы, создание оптимизированного алгоритма расчета и проведение вычислительных экспериментов для исследования нелинейных эффектов, возникающих при обтекании пластины потоком разреженной плазмы.

### **Основные решаемые задачи:**

- 1) Разработать физико-математические и численные модели для:
  - плоского пристеночного электрода, расположенного перпендикулярно потоку разреженной плазмы;
  - плоского пристеночного электрода, расположенного параллельно потоку разреженной плазмы;
  - плоского изолированного электрода, ориентированного параллельно или перпендикулярно набегающему потоку разреженной плазмы.
- 2) Создание оптимизированного алгоритма расчета для перечисленных в п.1 случаев.
- 3) Проведение обширных вычислительных экспериментов с целью получения функций распределения ионов (ФРИ) и электронов (ФРЭ) в различных точках возмущенной зоны вблизи пластины, а также профилей самосогласованных электрических полей. По полученным ФРИ и ФРЭ

рассчитываются их моменты: поля концентраций заряженных частиц, поля направленных скоростей, распределение плотности электрических токов по пластине.

4) Анализ нелинейных эффектов: концевой и краевого при различных ориентациях поверхности пластины относительно вектора скорости потока. Количественное исследование воздействия указанных нелинейных эффектов на структуру возмущенной зоны в зависимости от величины направленной скорости потока плазмы  $u_0$ , ширины пластины  $2r_0$ , её потенциала  $\varphi_0$ , отношения температур ионов и электронов  $\varepsilon$ .

**Научная новизна** диссертационной работы состоит в следующем:

1) Разработаны замкнутые физико-математические модели взаимодействия потока разреженной плазмы с плоской пластиной для:

– пластины, расположенной перпендикулярно потоку разреженной плазмы;

– пластины, расположенной параллельно потоку разреженной плазмы;

– изолированной пластины, ориентированной параллельно или перпендикулярно набегающему потоку разреженной плазмы

2) Показано, что выбор пластины в форме удлиненного прямоугольника позволяет все перечисленные в п.1 случаи свести к системе уравнений Власова-Пуассона в  $4^x$ -мерном фазовом пространстве, но с различными начальными и граничными условиями.

3) Проведенные методические расчеты позволили оптимизировать вычислительный алгоритм и реализовать его на ЭВМ средней мощности.

4) Впервые проведены обширные вычислительные эксперименты, в результате которых получены функции распределения ионов и электронов и распределение самосогласованных полей в достаточно широких интервалах изменения характерных параметров задачи:

$$\begin{aligned} 0 \leq u_0 \leq 7 \\ 5 \leq 2r_0 \leq 5 \cdot 10^2 \\ -20 \leq \varphi_0 \leq 10 \\ 0.5 \leq \varepsilon \leq 1 \end{aligned}$$

где  $\varphi_0 = \frac{\varphi}{M_\varphi}$ ,  $u_0 = \frac{u}{M_v}$ ,  $r_0 = \frac{r}{M_L}$ ,  $\varepsilon = \frac{T_i}{T_e}$  - безразмерные параметры;

$M_\varphi = \frac{kT_i}{e}$  - масштаб потенциала,  $M_L = r_D = \left( \frac{\varepsilon_0 kT_i}{e^2 n_{i\infty}} \right)^{1/2}$  - масштаб длины,

$M_v = \left( \frac{2kT_\alpha}{m_\alpha} \right)^{1/2}$  - масштабы скорости

В указанных интервалах получены распределения в возмущенной зоне пластины моментов ФРИ и ФРЭ (поля концентраций, скоростей, плотностей токов).

5) Впервые детально исследован концевой эффект, связанный с наличием скорости потока, направленной вдоль пластины. Получены условия, при которых указанным эффектом можно пренебречь при проведении физических экспериментов.

6) Впервые детально исследован краевой эффект, связанный с неоднородностью электрического поля на поверхности пластины. Показано его влияние на ФРИ, ФРЭ и распределение их моментов вблизи поверхности пластины. Указаны области изменения параметров, в которых этим эффектом можно пренебречь.

### **Практическая ценность работы**

– Разработанные оптимизированные алгоритмы расчета нестационарных, многомерных, многопараметрических задач взаимодействия тел плоской геометрии с потоками разреженной плазмы могут быть использованы при расчетах процессов переноса в разнообразных задачах пристеночной плазмы.

– Полученные на кинетическом уровне результаты по расчету возмущенной зоны вблизи пристеночных и выносных плоских электродов необходимы для понимания физических процессов, происходящих вблизи пластины, помещенной в поток разреженной плазмы.

– Данные по структуре возмущенной зоны необходимы при рассмотрении взаимодействия космических тел, движущихся в ионосфере Земли.

– Исследованные концевые и краевые эффекты позволяют более детально разобраться в структуре возмущенной зоны вблизи пластины в потоке разреженной плазмы.

### **Положения, выносимые на защиту**

1) Физико-математические и вычислительные модели расчета возмущенной зоны вблизи плоских электродов (пристеночных и выносных) в потоке разреженной плазмы.

2) Результаты вычислительных экспериментов, при которых получены функции распределения ионов и электронов вблизи поверхности плоских пристеночных и выносных ориентированных электродов, распределения моментов этих функций, а также распределения самосогласованных электрических полей.

3) Результаты по вычислению концевых и краевых эффектов и их влияние на структуру возмущенной зоны вблизи пластины в потоке разреженной плазмы.

**Достоверность** полученных в диссертации результатов подтверждается использованием классических математических моделей (модель Власова – Пуассона) и апробированных на широком классе задач численных методов.

Выбор шагов расчетной сетки по времени и фазовым переменным обосновывается методическими расчетами. Результаты вычислительных экспериментов сравнивались с результатами других авторов. Сравнение показало хорошее совпадение.

**Апробация работы.** Основные материалы диссертации докладывались на следующих научных конференциях:

– IX Международная конференция по «Неравновесным процессам в соплах и струях» (NPNJ2012, г. Алушта), 2012г.

– XXXIX Международная конференция по физике плазмы и УТС, г. Звенигород, 2012г.

– Всероссийская конференция «Инновации в авиации и космонавтике», г. Москва, МАИ, 2013г.

– XVIII Международная конференция по «Вычислительной механике и современным прикладным программным системам», г. Алушта, 2013г.

Результаты диссертационной работы неоднократно обсуждались на кафедре «Прикладная физика» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

**Публикации.** По результатам научных исследований в рамках диссертационной работы опубликовано 9 работ, в том числе 3 статьи в периодических изданиях, включенных в перечень ВАК; 5 публикаций в тезисах докладов Международных и Всероссийских конференций; получено одно свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы из 49 наименований и Приложения. Работа изложена на 128 страницах, содержит 82 рисунка.

## Основное содержание работы

**Введение** содержит обоснование актуальности и практической значимости темы диссертации, обзор и анализ литературы по теме диссертации, описание структуры и содержания работы.

**Глава 1** посвящена исследованию возмущенной зоны вблизи плоского электрода, расположенного параллельно потоку разреженной плазмы. Результаты, полученные в данной главе, пригодны также и для других условий, когда пластина в форме удлиненного прямоугольника расположена на большой плоской поверхности, обтекаемой параллельным потоком разреженной низкотемпературной плазмы (рис. 1).

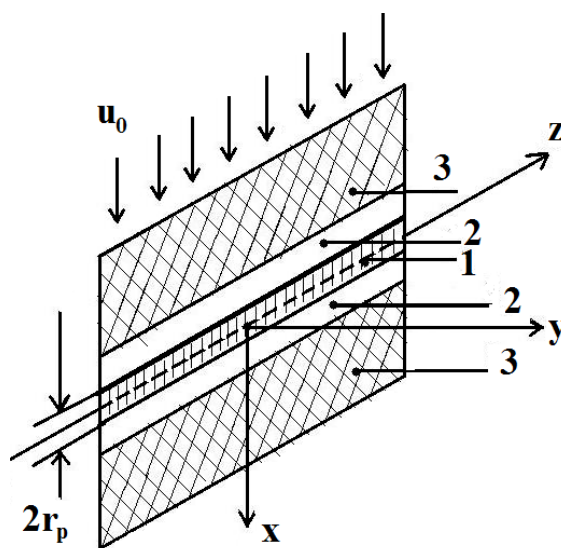


Рис. 1 Плоский электрод на диэлектрической плоскости

1 – плоский электрод

2 – охранные электроды

3 – диэлектрическая плоскость

Удлиненная сторона пластины должна располагаться перпендикулярно вектору скорости потока. Это необходимо для того, чтобы сократить размерность задачи в фазовом пространстве до четырёх  $(x, y, v_x, v_y)$ .

В разделе 1.1 формулируется физическая модель задачи, отмечены основные физические требования, которые должны учитываться при формулировке математической модели задачи.

Раздел 1.2 посвящен описанию математической модели задачи обтекания плоской пластины потоком разреженной плазмы при условии, что вектор скорости потока параллелен пластине. Исходная система уравнений – система Власова – Пуассона [1,2], которая в нашем случае записывается в виде:

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} + v_x \frac{\partial f_i}{\partial x} + v_y \frac{\partial f_i}{\partial y} + \frac{q_i}{m_i} \left( E_x \frac{\partial f_i}{\partial v_x} + E_y \frac{\partial f_i}{\partial v_y} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial f_e}{\partial t} + v_x \frac{\partial f_e}{\partial x} + v_y \frac{\partial f_e}{\partial y} + \frac{q_e}{m_e} \left( E_x \frac{\partial f_e}{\partial v_x} + E_y \frac{\partial f_e}{\partial v_y} \right) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = \frac{e}{\varepsilon_0} (n_e - n_i), \quad \mathbf{E} = -\nabla \varphi \quad (3)$$

В системе (1)÷(3)  $f_{i,e}$  - функции распределения ионов (ФРИ) и электронов (ФРЭ);  $n_{i,e}$ ,  $q_{i,e}$ ,  $m_{i,e}$  - концентрация, заряд, масса заряженных частиц.  $\mathbf{E} = E_x \mathbf{i} + E_y \mathbf{j}$ ,  $\varphi$  - напряженность и потенциал самосогласованного электрического поля;  $e$  - заряд электрона,  $\varepsilon_0$  - электрическая постоянная.

В качестве начального и граничного условия на внешней границе расчетной области для ФРИ и ФРЭ используется распределение Максвелла:

$$f_{i,e}(x, y, v_x, v_y) = n_{\infty} \pi^{-1} \left( \frac{m_{i,e}}{2kT_{i,e}} \right)^{3/2} \exp \left\{ -\frac{m_{i,e}}{2kT_{i,e}} \left[ (u_0 + v_x)^2 + v_y^2 \right] \right\} \quad (4)$$

Для решения уравнения Пуассона ставится условие

$$\begin{aligned} \varphi &= \varphi_p = const - \text{ на поверхности пластины и} \\ \varphi &= 0 - \text{ на всей остальной границе расчетной области.} \end{aligned} \quad (5)$$

Если получено решение задачи (1)÷(5), подсчитываются моменты ФРИ и ФРЭ.

$$n_{i,e} = \left( \frac{2kT_{i,e}}{m_{i,e}} \right)^{1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f_{i,e} dv_x dv_y \quad (6)$$

$$j_{i,e} = \left( \frac{2kT_{i,e}}{m_{i,e}} \right)^{1/2} q_{i,e} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^0 f_{i,e} v_y dv_x dv_y \quad (7)$$

где  $j_{i,e}$  - плотность токов ионов и электронов.

Система (1)÷(7) составляет замкнутую математическую модель задачи.

**Разделы 1.3 – 1.4** содержат описание численной модели задачи (1) ÷ (7) после приведения её к безразмерному виду с помощью стандартной системы масштабов [1,2] и оптимизации вычислительного алгоритма.

Уравнения Власова для ионов (1) и для электронов (2) решались методом крупных частиц Давыдова [3], или методом характеристик [4]. Эволюция возмущенной зоны начиналась после импульсного изменения потенциала пластины от некоторого начального значения до потенциала  $\varphi_p$ . Использовался метод последовательных итераций по времени, причем на



каждом временном слое подсчитывалось новое значение напряженности электрического поля путем решения уравнения Пуассона (3). Правая часть уравнения (3) определялась по формуле (6) с использованием ФРИ и ФРЭ из предыдущего шага по времени. Решение осуществлялось до момента установления тока, поступающего на пластину из плазмы. Программный блок написан на языке программирования TMT Pascal v.3.50 и состоит из двух частей. Первая часть включает саму программу численного моделирования. Вторая часть – это графическая обработка полученных результатов. Она позволяет получить практически любую зависимость в любом виде в рамках введенных исходных данных и средств языка программирования.

Для выбора оптимального вычислительного алгоритма проведена серия методических расчетов. В результате удалось добиться приемлемого времени счета одного варианта на ЭВМ средней мощности.

В разделе 1.5 приведены результаты вычислительных экспериментов. На рис.2а,б приведены функции распределения ионов в нескольких характерных точках вблизи пластины.

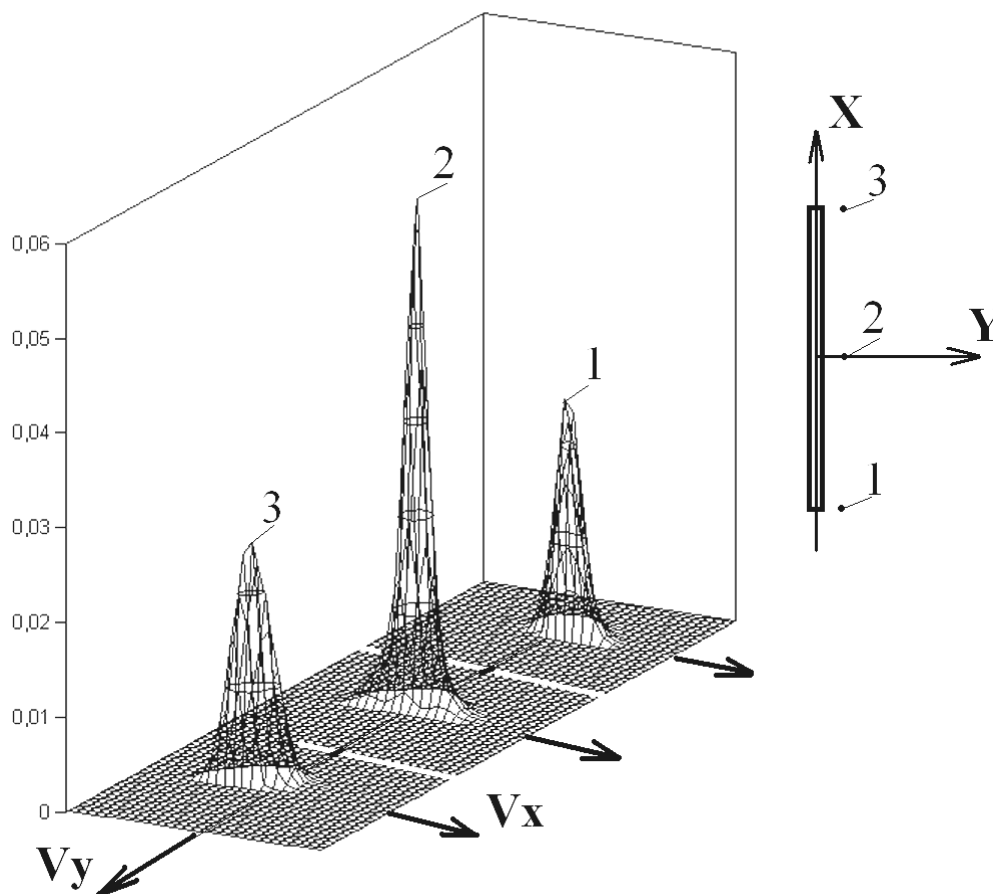


Рис. 2а Функции распределения ионов ( $r_0 = 10; \varphi_0 = -10; u_0 = 0; \varepsilon = 1$ ).

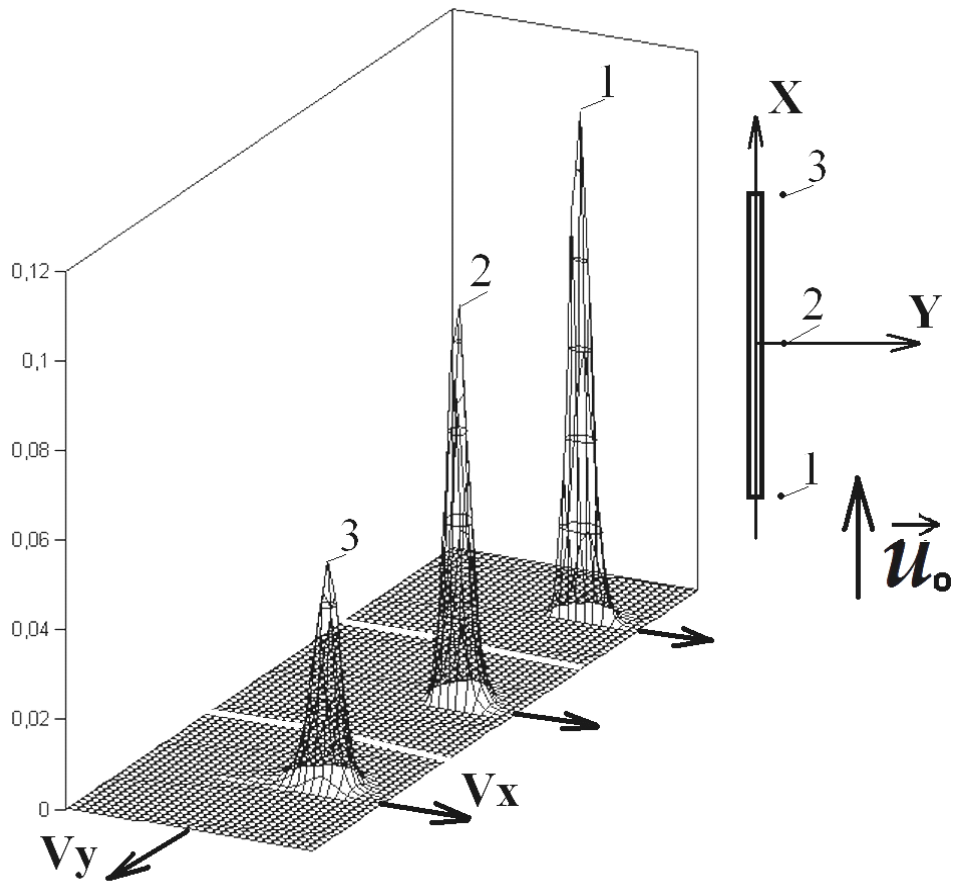


Рис. 2б Функции распределения ионов  
 $(r_0 = 10, \varphi_0 = -10, u_0 = 5, \varepsilon = 1)$

На рис.3 дано распределение плотности тока по пластине, а на рис.4 – распределение концентраций заряженных частиц.

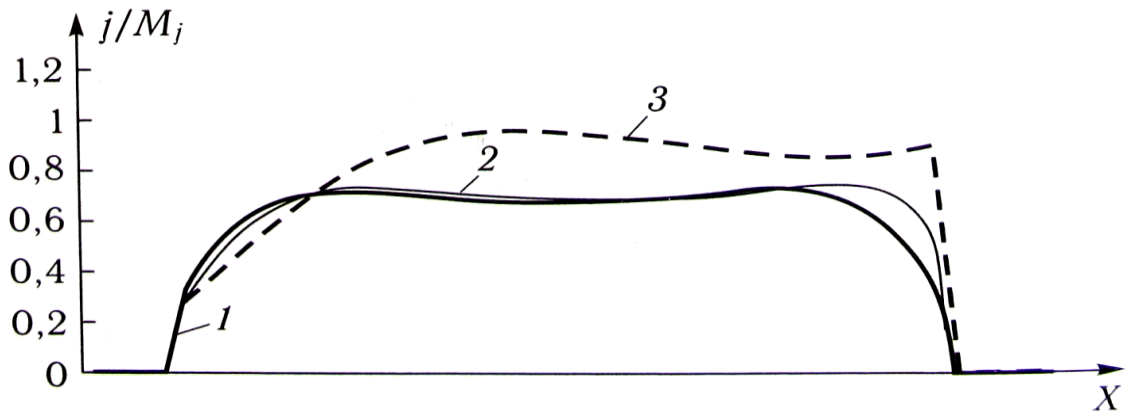


Рис. 3 Распределения плотности ионного тока вдоль оси  $X$   
 $(r_0 = 10, \varphi_0 = -10, \varepsilon = 1)$ . 1 –  $u_0 = 0$ ; 2 –  $u_0 = 1$ ; 3 –  $u_0 = 5$

$$M_j = eM_n M_v = en_{i\infty} \left( \frac{2kT_i}{m_i} \right)^{1/2}$$

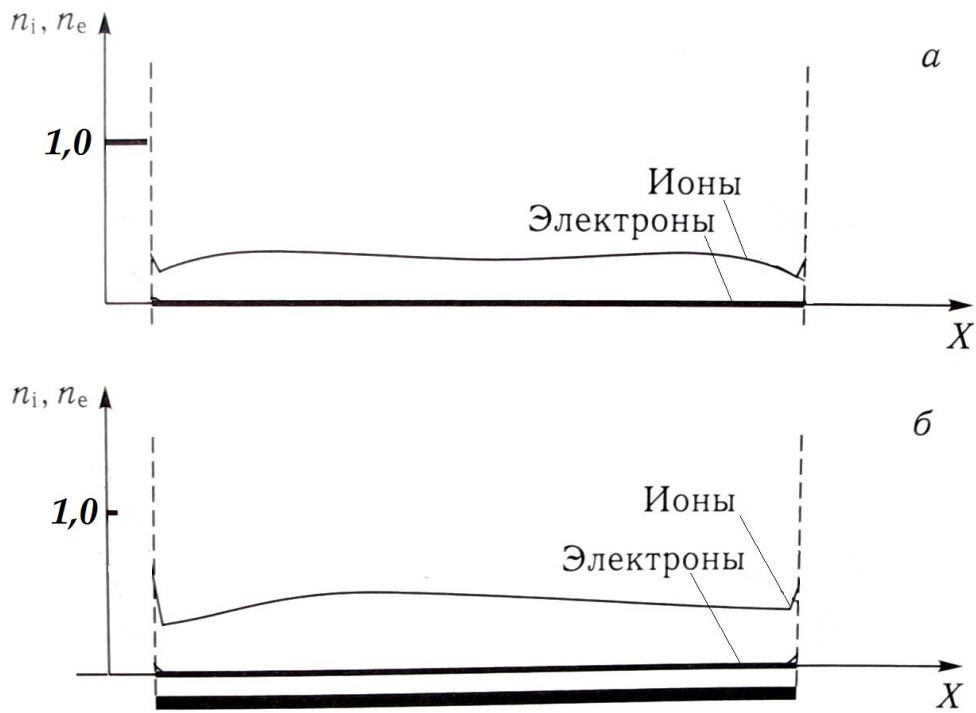
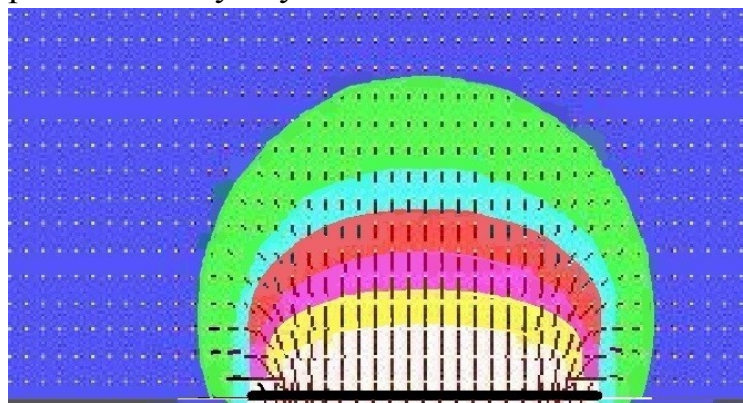
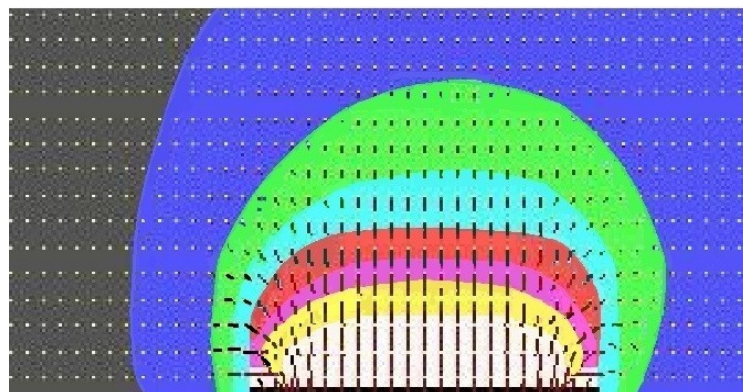


Рис. 4 а,б Распределение концентраций ионов и электронов вдоль оси  $X$   
 $r_0 = 10, \varphi_0 = -10, \varepsilon = 1$  а)  $u_0 = 0$ ; б)  $u_0 = 5$   
 (При  $\varphi_0 = -10, n_e \square$  )

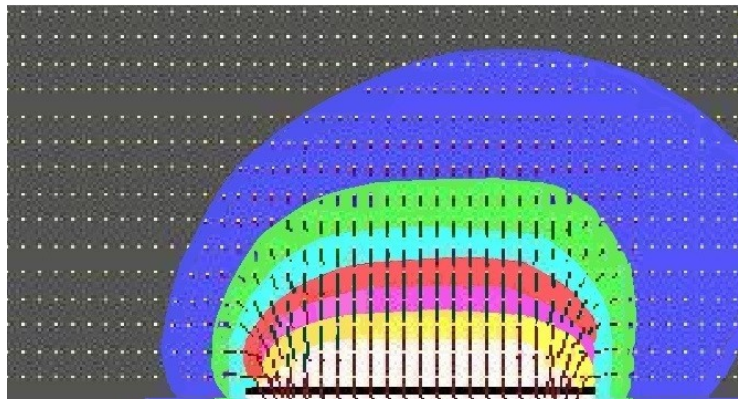
На рис.5,6 представлено распределение напряженности и потенциала электрического поля вблизи пластины, а также поле скоростей ионов.  $\varphi = const$  есть граница между двумя цветами.



а)  $u_0 = 0$

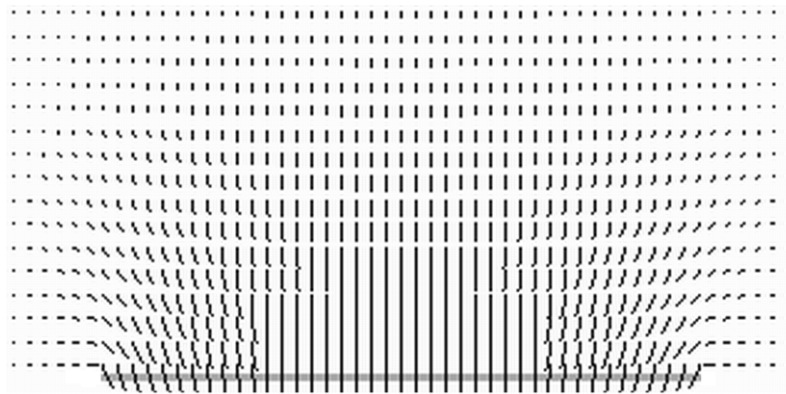


б)  $u_0 = 1$

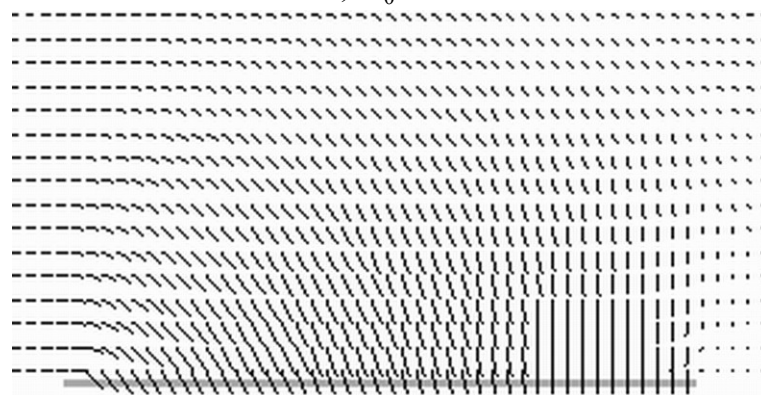


в)  $u_0 = 5$

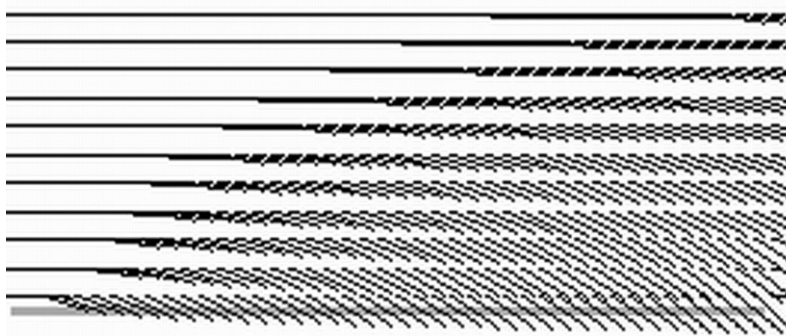
Рис. 5а,б,в Распределение напряженности и потенциала



а)  $u_0 = 0$



б)  $u_0 = 1$



в)  $u_0 = 5$

Рис. 6а,б,в. Поле скоростей ионов ( $r_0 = 10$ ;  $\varphi_0 = -10$ ;  $\varepsilon = 1$ )  
(Направление и величина скорости определяется направлением и величиной отрезка на рисунке)

В заключении раздела 1.5 дается подробный анализ концевых и краевых эффектов и зависимость этих нелинейных эффектов от параметров задачи.

**Глава 2** диссертации посвящена исследованию возмущенной зоны вблизи пластины, расположенной перпендикулярно потоку разреженной плазмы. В этом случае поток падает на пластину нормально (рис. 7).

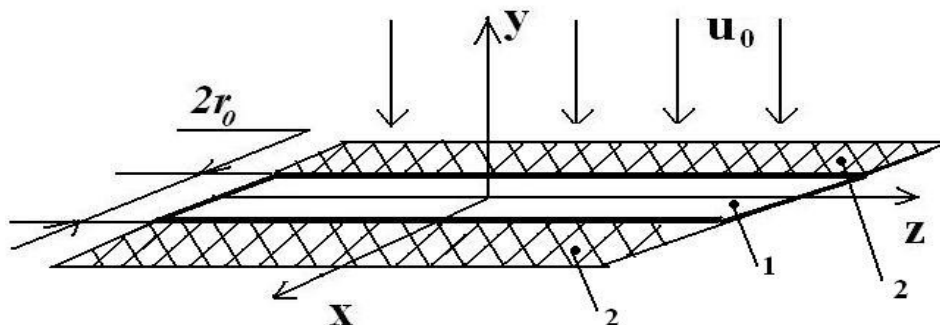


Рис. 7. Расположение пластины в потоке плазмы  
1- плоский электрод (удлиненный прямоугольник)  
2 – диэлектрическая плоскость

Структура и последовательность изложения материала главы 2 полностью соответствует главе 1.

В **разделах 2.1 – 2.2** рассмотрена физико-математическая модель задачи. Система дифференциальных уравнений в данном случае совпадает с системой (1) ÷ (3). Изменяются лишь начальное и граничное условия для ФРИ и ФРЭ. При нормальном падении разреженной плазмы на пластину условие (4) заменяется на следующее:

$$f_{i,e}(x, y, v_x, v_y) = n_\infty \pi^{-1} \left( \frac{m_{i,e}}{2kT_{i,e}} \right)^{\frac{3}{2}} \exp \left\{ -\frac{m_{i,e}}{2kT_{i,e}} \left[ v_x^2 + (v_y - u_0)^2 \right] \right\} \quad (8)$$

Таким образом, замкнутая математическая модель задачи при нормальном падении потока на пластину включает уравнения (1) ÷ (3), (5) ÷ (8).

В **разделе 2.3** изложены особенности вычислительной модели, программного блока, методические расчеты. В основном, алгоритм расчета возмущенной зоны вблизи пластины в данном случае напоминает алгоритм, изложенный в главе 1.

В **разделе 2.4** представлены результаты вычислительных экспериментов с пластиной, расположенной поперек потока разреженной плазмы. На рис. 8 даны ФРИ при значении безразмерной скорости  $u_0 = 5$ . По своей структуре они напоминают ФРИ рис. 2б. Однако имеется и различие, т.к. в данном случае отсутствует концевой эффект, а краевой эффект с ростом  $u_0$  понижает свое влияние на плотность тока. Это связано с тем, что



составляющая плотности тока, связанная со скоростью, пропорциональна  $u_0$ , а составляющая, связанная с краевым эффектом, изменяется мало.

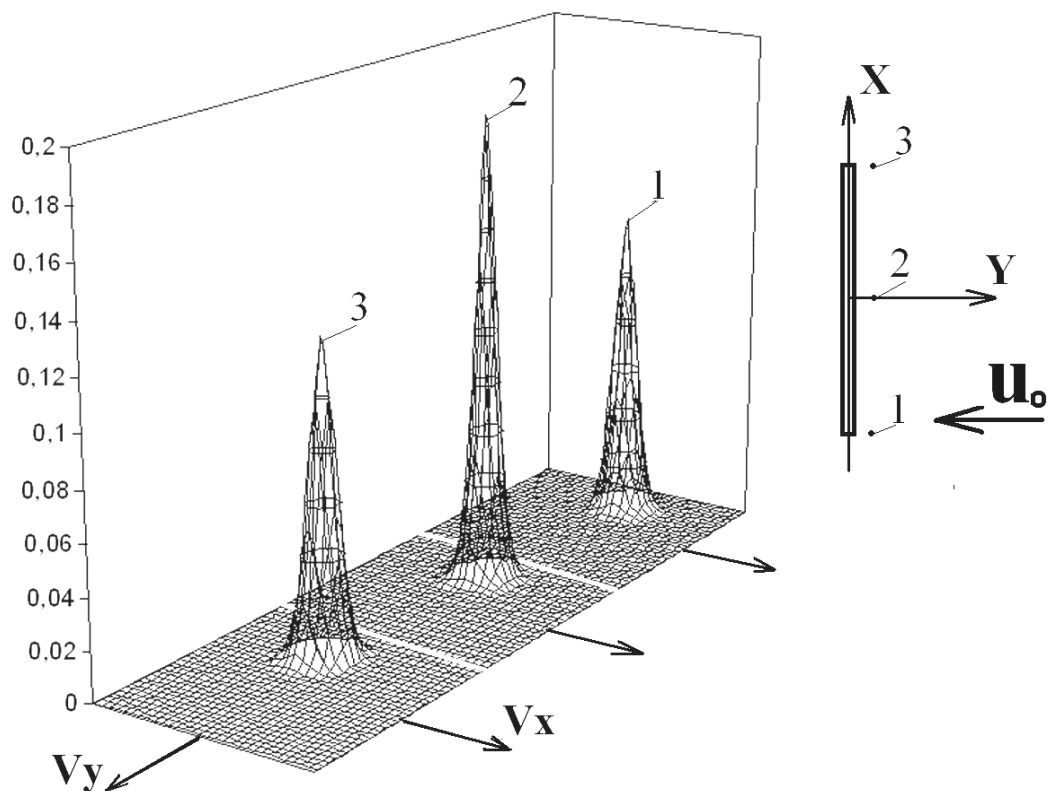


Рис. 8. Функции распределения ионов ( $r_0 = 10; \varphi_0 = -10; u_0 = 5; \varepsilon = 1$ ).

На рисунках 9 – 12 приведены поля концентраций (рис. 9а,б), поля скоростей ионов (рис. 10а,б), распределение ионного тока вдоль пластины (рис. 11а,б), а также распределение напряженности и потенциала (рис. 12а,б).

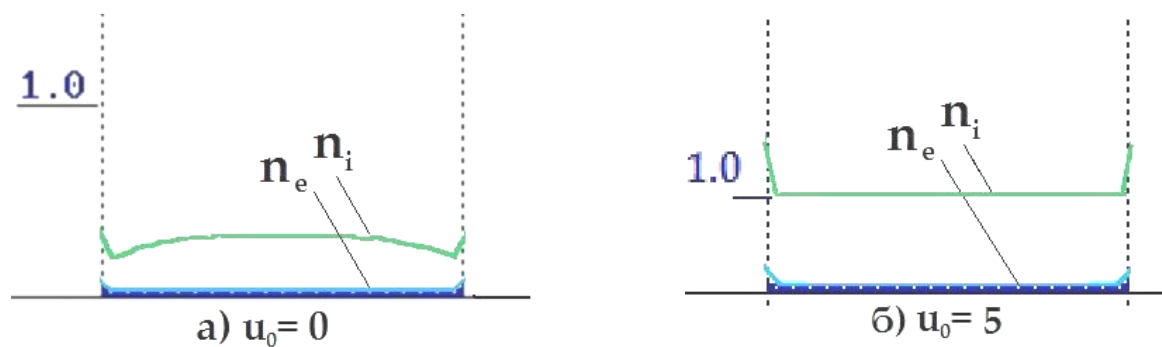
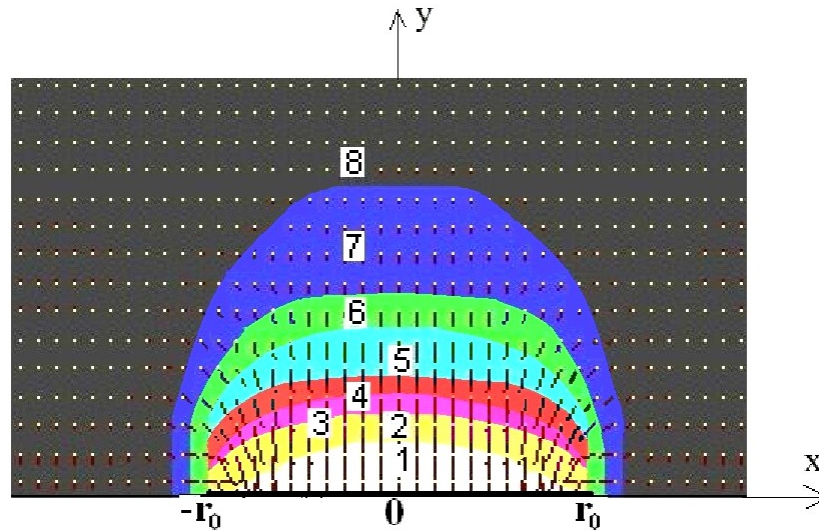


Рис. 9 а,б Распределение концентраций  $n_{i,e}(x)$  ( $r_0 = 10, \varphi_0 = -10, \varepsilon = 1$ )





б)  $u_0 = 5$

Рис. 12 а,б Распределение напряженности и потенциала электрического поля вблизи пластины ( $r_0 = 10, \varphi_0 = -10, \varepsilon = 1$ )

В отличие от главы 1, все перечисленные распределения симметричны относительно плоскости ( $yz$ ), т.к. отсутствует концевой эффект.

Как следует из рис.12, возмущенная зона вблизи пластины уменьшается по размеру с ростом  $u_0$  и прижимается к пластине. При относительно больших значениях  $u_0$  изменение направленной скорости за счет влияния электрического поля проявляется слабо (рис. 10), а концентрация и плотность тока практически не изменяется по ширине пластины (рис. 9, 11).

В Приложении №2 к диссертации показано, что плотность тока на пластину при нормальном падении потока плазмы определяется формулой:

$$j_i = en_{i\infty}u_\infty \sqrt{1 + \frac{2e|\varphi_p|}{m_i u_\infty^2}}, \quad (9)$$

которая при больших скоростях дает

$$j_i = en_{i\infty}u_\infty = const \quad (10)$$

Формула (10) хорошо согласуется с рис. 10б, 11б.

Индекс « $\infty$ » относится к размерным значениям  $n_i, u$  на внешней границе расчетной области.

В разделе 2.5 сформулированы выводы из главы 2.

В Главе 3 рассмотрена задача о пристеночной области вблизи пластины, расположенной в потоке невозмущенной разреженной плазмы. Такую пластину можно рассматривать как независимое тело, находящееся в потоке разреженной плазмы (или как плоскую часть прибора или устройства, находящегося на некотором удалении от поверхности космического тела).

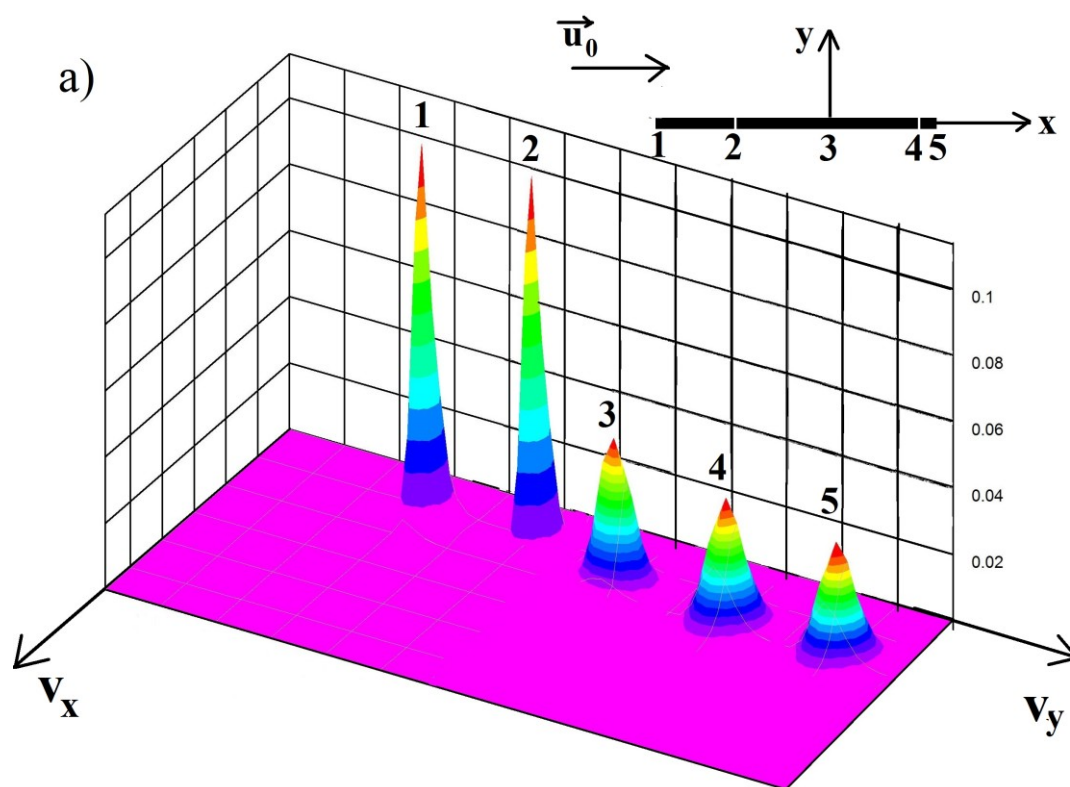


Рассмотрены два варианта такой пластины: пластина ориентирована вдоль потока и навстречу потоку.

В **разделе 3.1** рассмотрена физическая и математическая модели задачи. Система дифференциальных уравнений при параллельном обтекании пластины имеет вид (1) ÷ (3) с дополнительными условиями (4) ÷ (7). В случае перпендикулярного обтекания система уравнений имеет вид (1) ÷ (3), (5) ÷ (8). Приведение модели отличаются лишь тем, что исследуемая пластина не располагается на большой диэлектрической плоскости, поэтому не нужно ставить граничные условия на этой плоскости.

В **разделе 3.2** рассмотрена численная модель задачи, алгоритм решения системы (1) ÷ (3) с дополнительными условиями, методические расчеты и вопросы оптимизации программы.

**Раздел 3.3** посвящен результатам вычислительных экспериментов при двух ориентациях пластины относительно вектора скорости потока. Ввиду большого объема проведенных исследований в разделе 3.3 приведены только результаты с пластинами размером  $r_0=100$ . Чтобы не загромождать изложение, результаты других расчетов вынесены в Приложение 3.



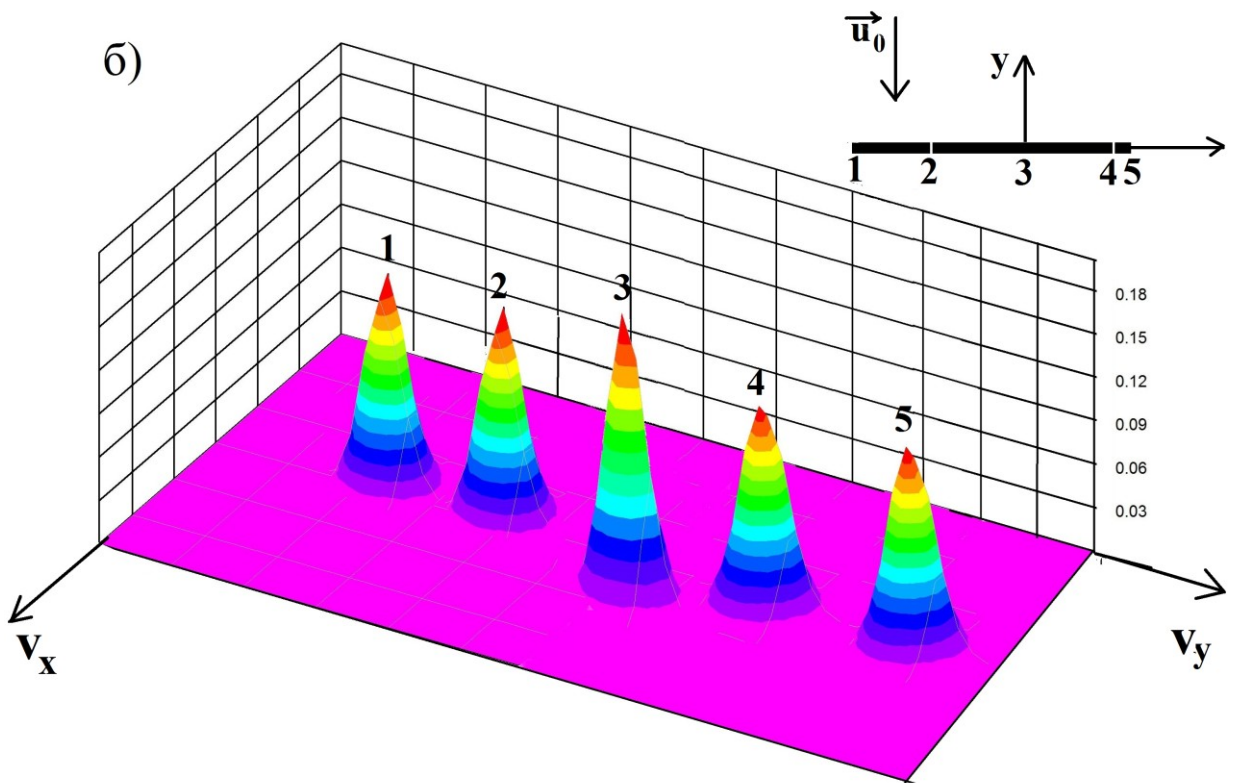


Рис. 13а,б Функции распределения ионов  
 $r_0 = 60, \varphi_0 = \varphi_{\text{охр. электрода}} = -10, \varepsilon = 1, u_0 = 5$

- а) Пластина расположена параллельно потоку плазмы  
 б) Пластина расположена перпендикулярно потоку плазмы

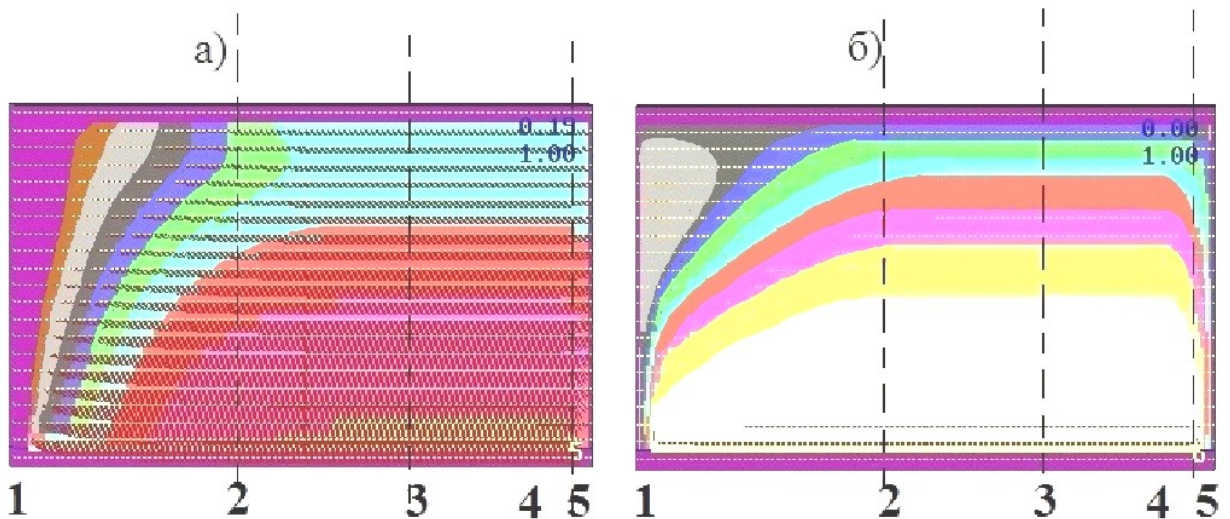


Рис. 14а,б Поля концентраций заряженных частиц при параллельном обтекании пластины

$(r_0 = 60, r_0 + r_{\text{охр. электрода}} = 100, \varphi_0 = \varphi_{\text{охр. электрода}} = -10, \varepsilon = 1, u_0 = 5)$

- а) Поле концентраций ионов  
 б) Поле концентраций электронов

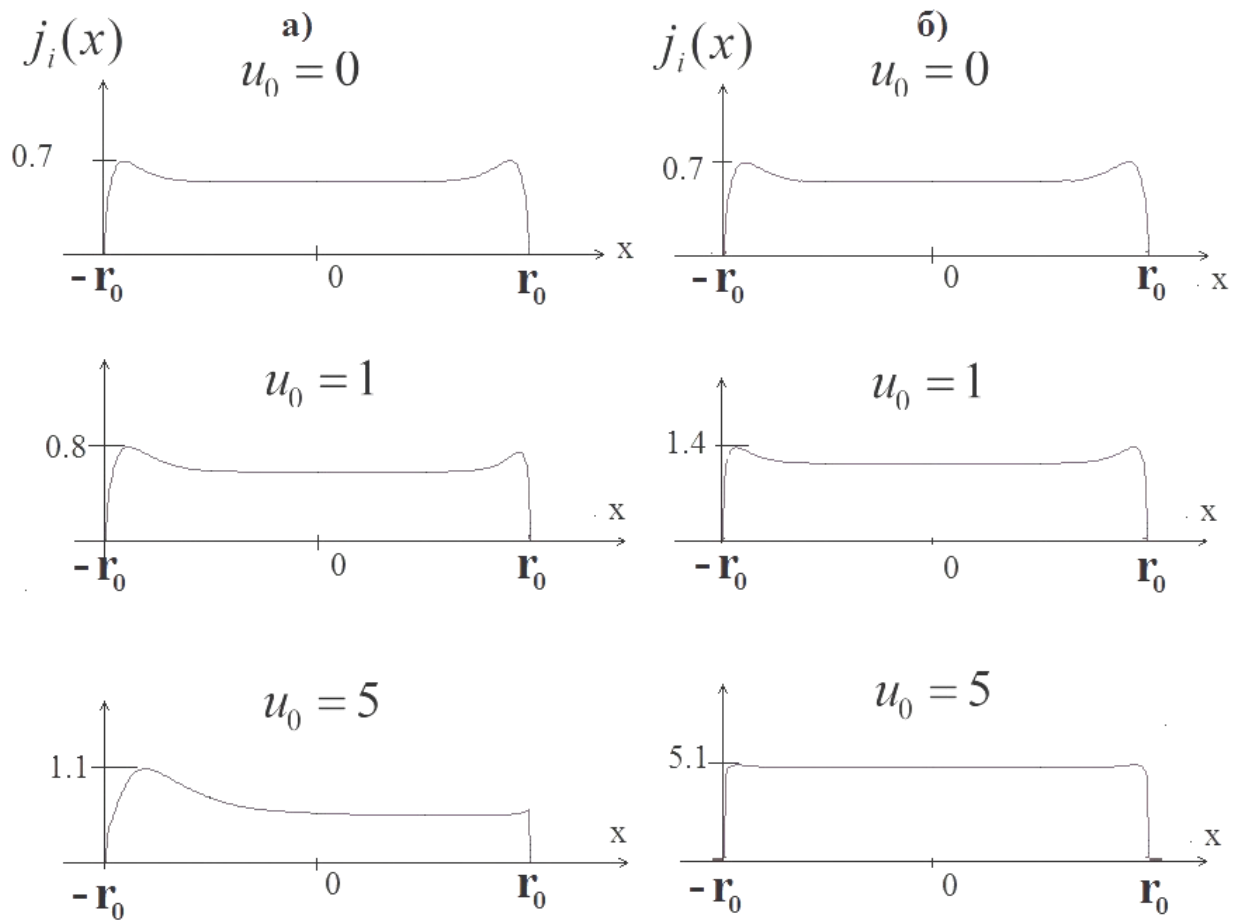


Рис. 15а,б Распределение плотности потока ионов вдоль оси  $X$   
 $(r_0 = 60, r_0 + r_{\text{охран. электрода}} = 100, \varphi_0 = \varphi_{\text{охран. электрода}} = -10, \varepsilon = 1)$

а) Пластина вдоль потока      б) Пластина перпендикулярно потоку

В разделе 3.4 изложен анализ концевого и краевого эффектов. В этом разделе обобщим полученные в результате вычислительных экспериментов данные и делаем количественные оценки.

На рис. 16 приведена зависимость  $\frac{(j_i)_{\text{max}}}{(j_i)_{\text{уст.}}}$  от  $u_0$  для переднего и удаленного краев пластины.

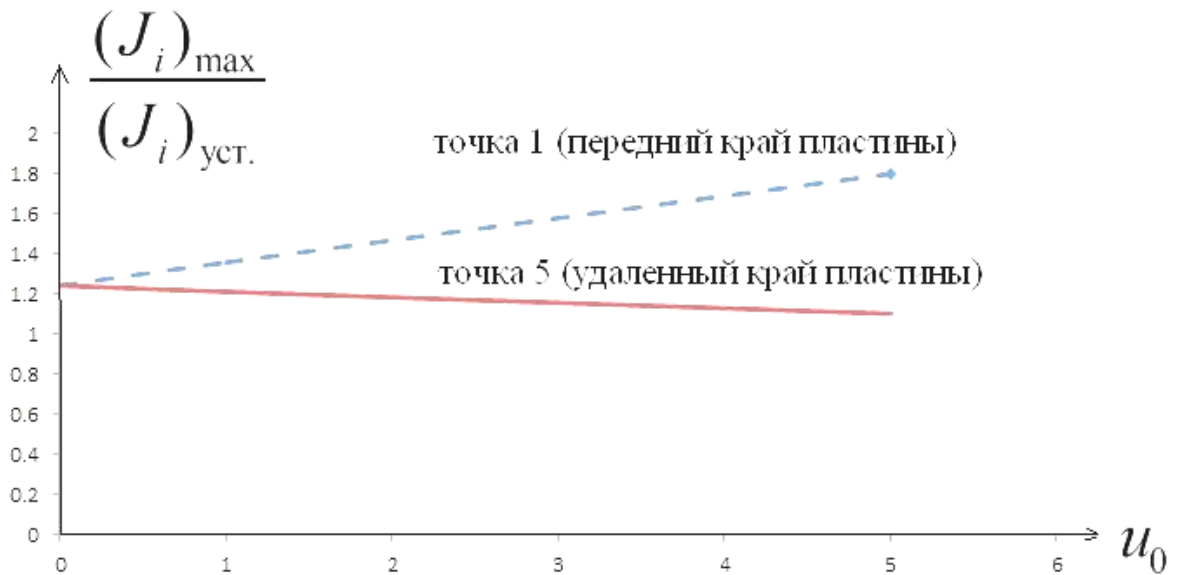


Рис.16 Зависимость влияния совместного концевго и краевого эффектов на плотность тока от  $u_0$  ( $r_0 = 100, \varphi_0 = -10, \varepsilon = 1$ )

На рисунке 17 показана зависимость нелинейного участка  $\Delta$  в радиусах Дебая от  $u_0$  на переднем и удаленном крае пластины

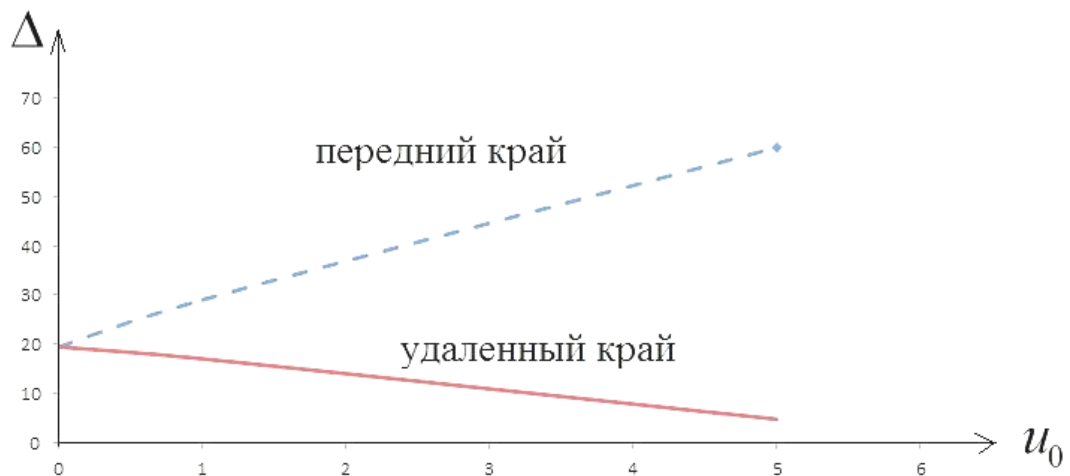
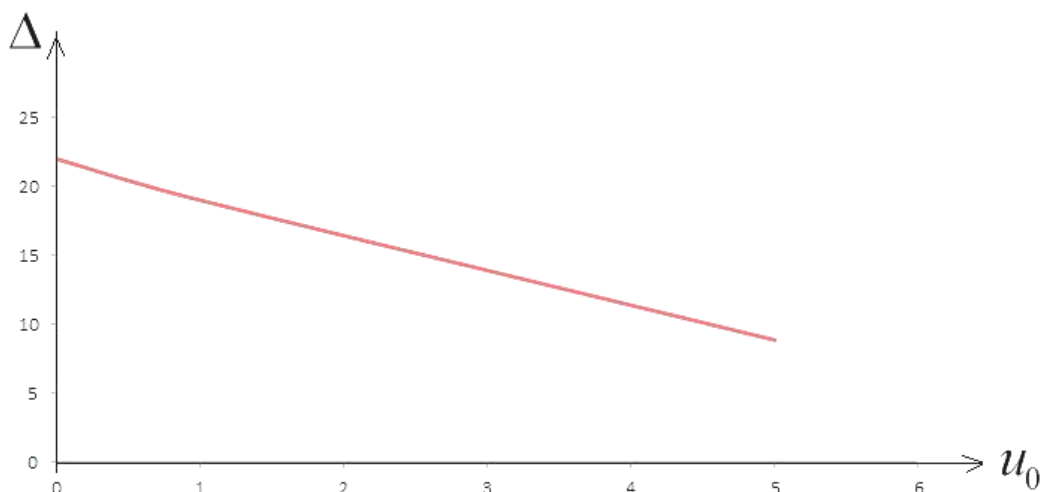


Рис.17 Зависимость величины участка, на котором проявляются нелинейные эффекты от параметра  $u_0$  ( $r_0 = 100, \varphi_0 = -10, \varepsilon = 1$ )

На рисунке 18 приведена зависимость, аналогичная рисунку 17, при нормальном падении потока на пластину.



*Рис.18 Зависимость величины участка, на котором проявляется краевой эффект от параметра  $u_0$  ( $r_0 = 100, \varphi_0 = -10, \varepsilon = 1$ )*

**В последнем разделе 3.5 даны выводы из гл.3.**

### **Основные результаты и выводы**

1) Разработаны физико-математические и численные модели взаимодействия плоского электрода с потоками разреженной плазмы для следующих условий:

- плоский электрод расположен в лобовой части спутника;
- плоский электрод расположен на боковой части спутника;
- плоский электрод, расположен перпендикулярно и параллельно потоку невозмущенной разреженной плазмы.

2) Созданы оптимизированные вычислительные алгоритмы, предназначенные для численного моделирования возмущенной зоны вблизи пластины для трёх случаев, указанных в п.1.

3) По результатам вычислительных экспериментов получены функции распределения ионов и электронов в различных точках возмущенной зоны вблизи пластины, распределение самосогласованных электрических полей, а также моментов ФРИ и ФРЭ.

4) Проведено детальное исследование концевого эффекта и даны рекомендации по уменьшению его влияния на возмущенную зону.

5) Проведено детальное исследование краевого эффекта и даны рекомендации по уменьшению его влияния на возмущенную зону.

6) Предложена идея и даны рекомендации по использованию охранных электродов при проведении физических экспериментов с плоскими электродами в потоках разреженной плазмы.

## **Цитируемая литература**

1. Котельников В.А., Ульданов С.В., Котельников М.В. Процессы переноса в пристеночных слоях плазмы. М.: Наука, 2004, 422 с.
2. Котельников В. А., Котельников М. В., Гидаспов В. Ю. Математическое моделирование обтекание тел потоками столкновительной и бесстолкновительной плазмы – М.: Физмалит, серия «Фундаментальная и прикладная физика», 2010г., 266с.
3. Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц // Математическая энциклопедия. М.: Сов. Энциклопедия, 1985. т.3, с 125-129.
4. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. М.: Наука, 1989, 608 с

## **Список публикаций соискателя по теме диссертации**

### **I. Научные труды, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:**

- 1) Котельников М.В., Нгуен С.Т. Оптимизация программного блока в задачах механики и электродинамики пристеночной плазмы. //Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 50, объём статьи 9 стр.
- 2) Котельников М.В., Нгуен С.Т. Методика использования компьютерной графики в вычислительных экспериментах. //Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 53, объём статьи 18 стр.
- 3) Котельников В.А., Котельников М.В., Нгуен Суан Тхау. Математическое моделирование возмущенной зоны вблизи плоского электрода, обтекаемого потоком разреженной плазмы. //Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 69, объём статьи 16 стр.

### **II. Другие научные труды, опубликованные по теме диссертации:**

- 1) Котельников М.В, Нгуен Суан Тхау. Численное моделирование краевого и концевых эффектов для пластины, обтекаемой разреженной плазмой. //Материалы IX международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2012), г. Алушта, 25 – 31 мая 2012 г, с. 225-226.
- 2) Котельников М.В, Нгуен Суан Тхау. Морозов А.В. О влиянии краевого и концевых эффектов на структуру возмущенной зоны вблизи пластины, обтекаемой разреженной плазмой. //XXXIX Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 6 – 10 февраля 2012 г. Сборник тезисов докладов, с. 176
- 3) Котельников М.В, Нгуен Суан Тхау. Численное моделирование структуры возмущенной зоны вблизи пластины в потоке разреженной плазмы. //XXXIX Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и УТС, 6 – 10 февраля 2012 г. Сборник тезисов докладов, с. 175

4) Котельников М.В., Нгуен С. Т. Поля концентраций, потенциалов и скоростей заряженных частиц вблизи пластины в потоке разреженной плазмы. //Инновации в авиации и космонавтике 2013, МАИ, 16-18 апреля 2013г. Сборник тезисов докладов, с. 133.

5) Котельников М.В., Нгуен С. Т. Численное моделирование структуры возмущенной зоны вблизи пластины, расположенной поперек потока разреженной плазмы. //Материалы XVIII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам, Алушта, 22-31 мая 2013г., с. 592-593.

6) Котельников М.В., Мальцев-Горский Д.А., Нгуен С.Т.

«Программа расчета обтекания цилиндрического тела, помещенного в поток разреженной плазмы». //Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011617540.