

**Математическое моделирование мощного
плазменного космического двигателя:
*зарубежный опыт и предложение по организации
расчётов в России***

АО «Т-платформы». Мурашов А.В.
ВНИИА им. Н.Л. Духова. Читайкин В.И.

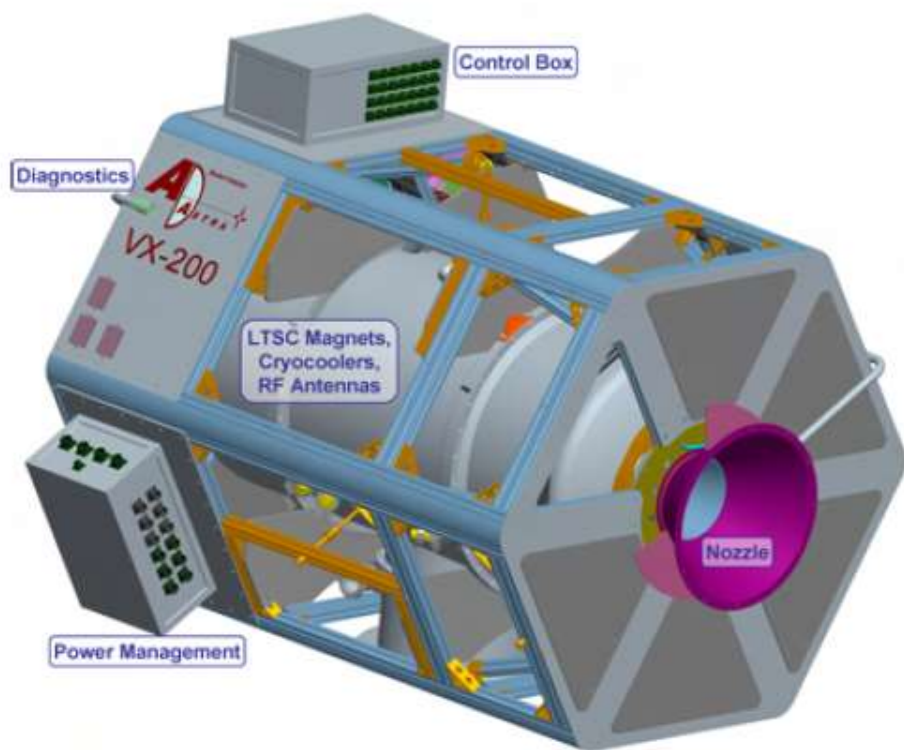
24 сентября 2019 года

**Мощный плазменный космический двигатель (М-ПКД)
предназначен для обеспечения движения космического аппарата
в безвоздушном космическом пространстве**

В НИЦ «Курчатовский институт» подготовлен Проект по тематике М-ПКД

Параметр	Штатный М-ПКД	Стендовый макет
Тяга	10 Н ... 300 Н	1 Н ... 9 Н
Удельный импульс		10000 с ... 1000 с
Расход рабочего тела (аргон)	0,1 грамм/с ... 3 грамм/с	0,1 грамм/с
Скорость истечения рабочего тела (аргон)	100 км/с	70 км/с ... 100 км/с
Вводимая электрическая мощность	от 200 кВт до 3 МВт (варианты)	150 кВт
Источник электрической энергии	Ядерный источник электрической энергии	Внешние электрические сети
Условия	Космическое пространство	Наземный стенд
Статус работ в Проекте	Проработка концептуального облика	Разработка, изготовление, экспериментальные исследования

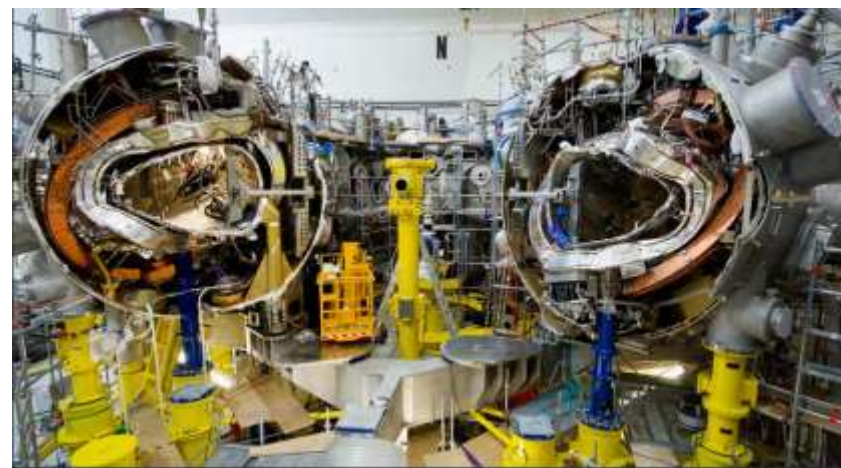
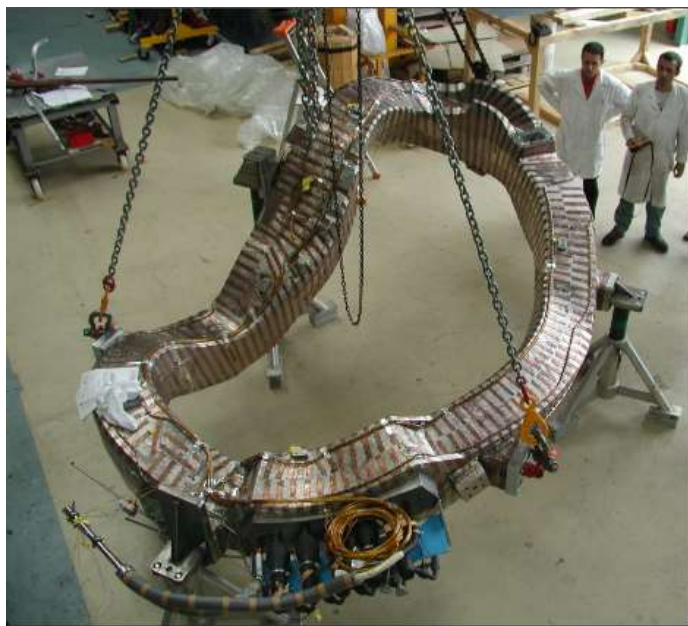
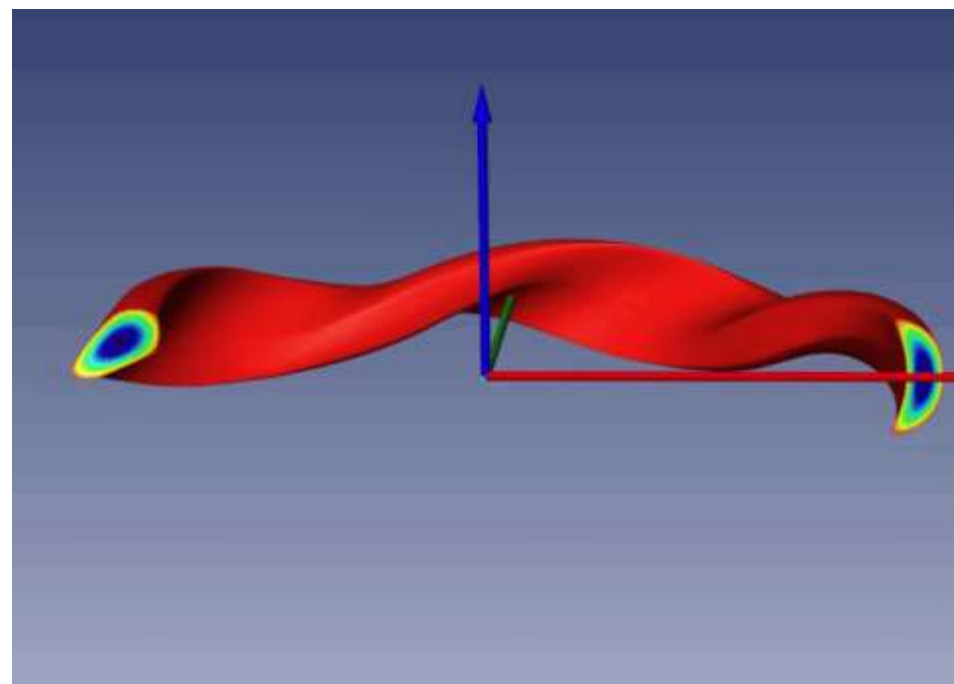
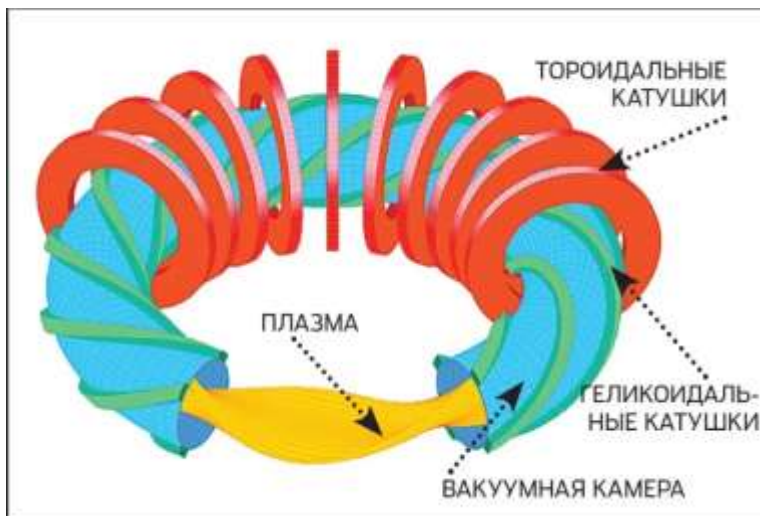
Модель и установка VX 200



Вакуумная камера VX 200



Стеллоратор



Вариант установки для тестирования VASIMR

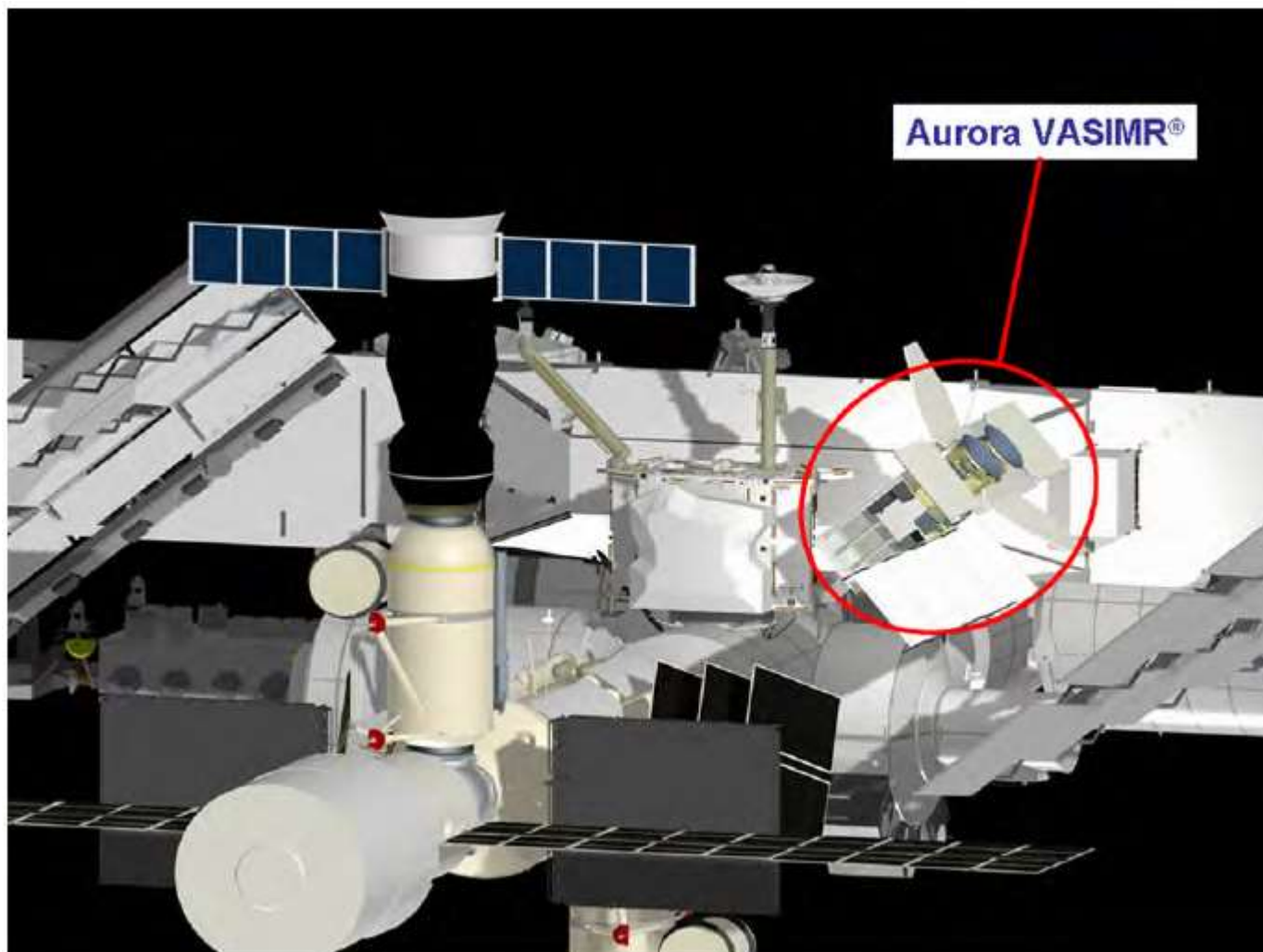
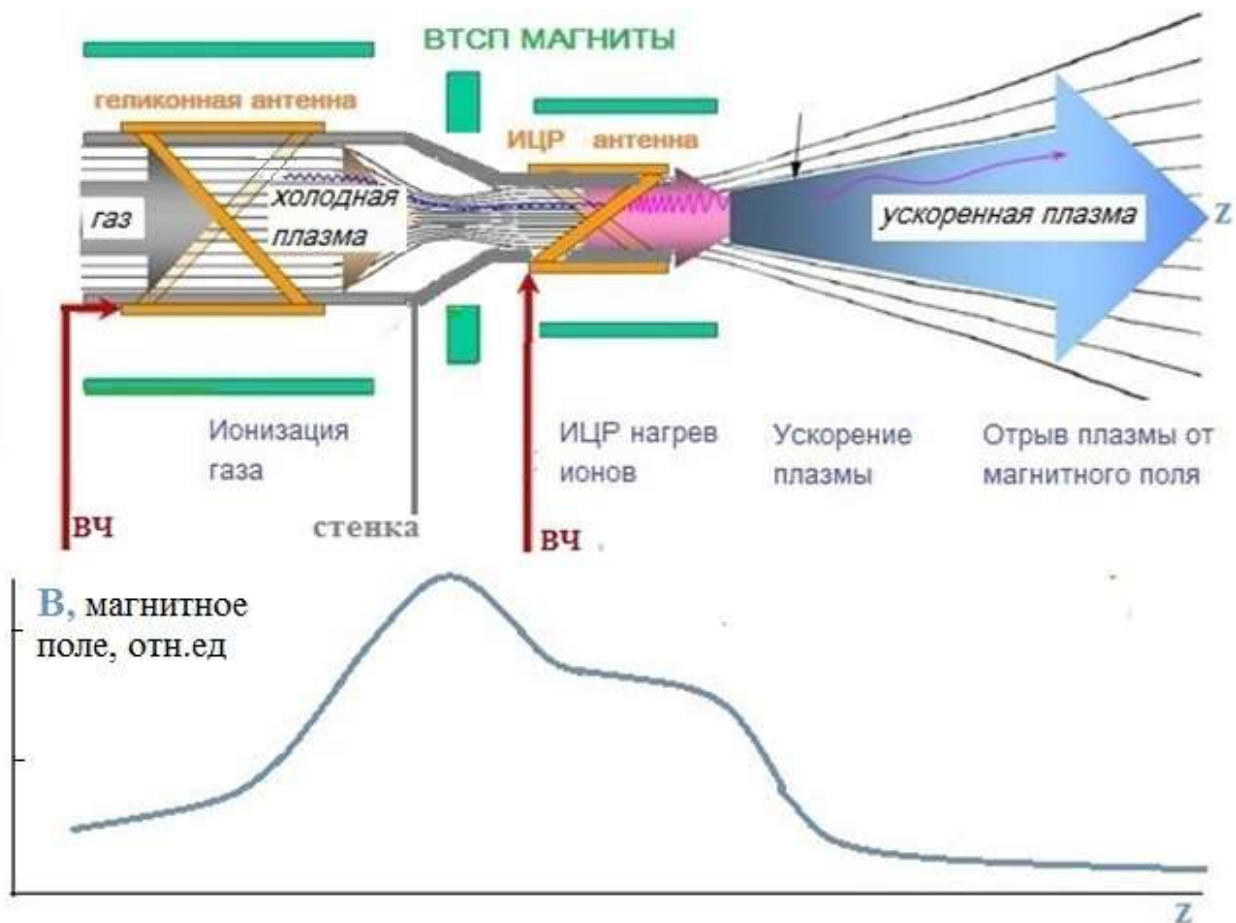


Схема мощного плазменного космического двигателя и распределение напряженности магнитного поля вдоль его оси



Физические процессы в М-ПКД *(по ходу движения рабочего тела – аргона)*

Этап 1. Ионизация газа и создание «холодной» плазмы с помощью геликонового разряда.

Этап 2. Получение «горячей» плазмы с помощью ионного циклотронного резонанса.

Этап 3. Формирование ионной струи для создания тяги с помощью магнитного сопла.

В США ведутся работы по тематике М-ПКД в рамках проекта VASIMR (Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket – магнитоплазменная ракета с изменяемым удельным импульсом).

Стадия: наземная отработка экспериментального модуля мощностью 200 кВт.

В работах по проекту VASIMR активно используется математическое моделирование двигателя, выполняется комплексный численный анализ физических процессов, происходящих в нём.

Публичное упоминание о численном моделировании в области исследований VASIMR было в 1998 г. (ELSEVIER Vol.38 i8 1998.09 P.725-739)

Численное моделирование проводилось с использованием разрабатываемого прикладного программного обеспечения EMIR code.

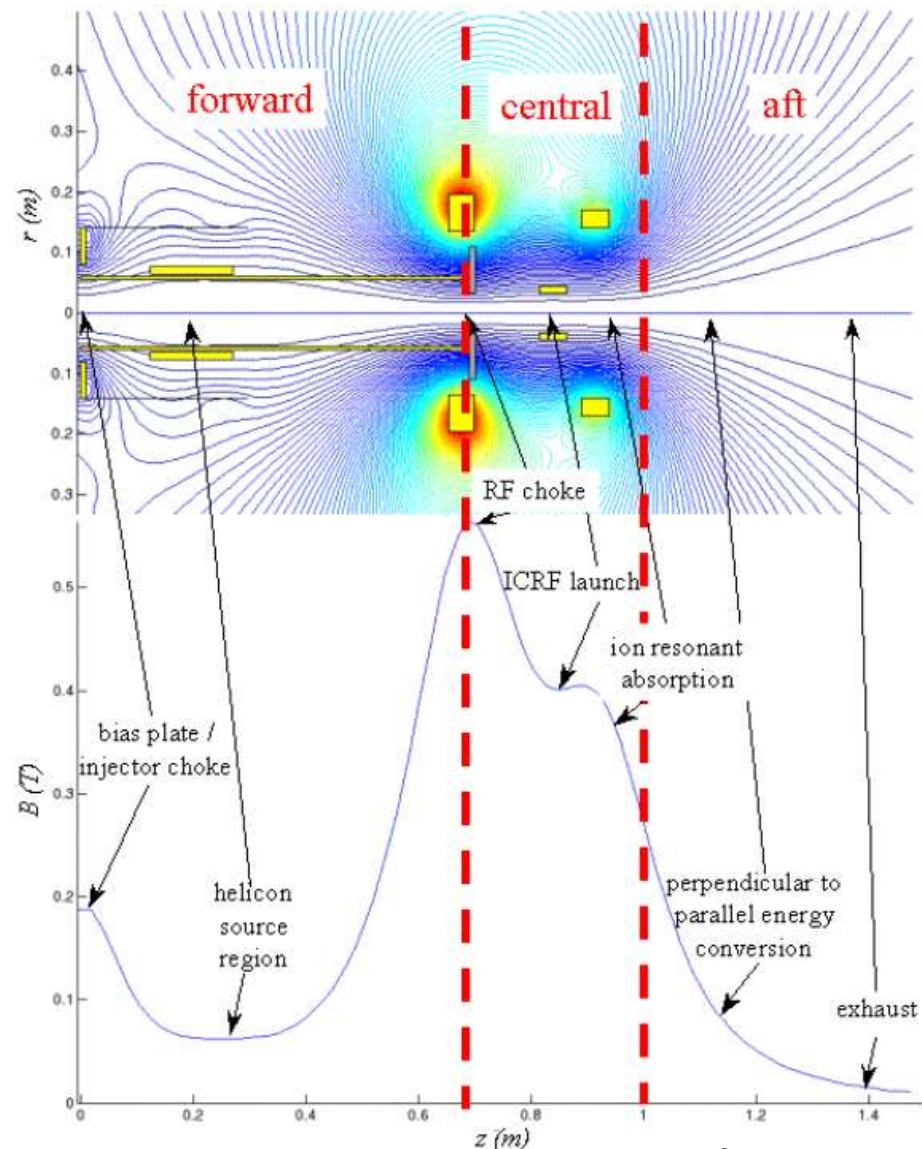
Первое публичное упоминание о численном моделировании VASIMR было в Январе 2002 г. (AIAA 2002-0346 Simulations of Plasma Detachment in VASIMR, 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit 14-17 January 2002 / Reno, NV)

Первый газодинамический расчет датирован 2002 годом.

Моделирование магнитных явлений

Численное моделирование проводилось совмещением трех технологий:

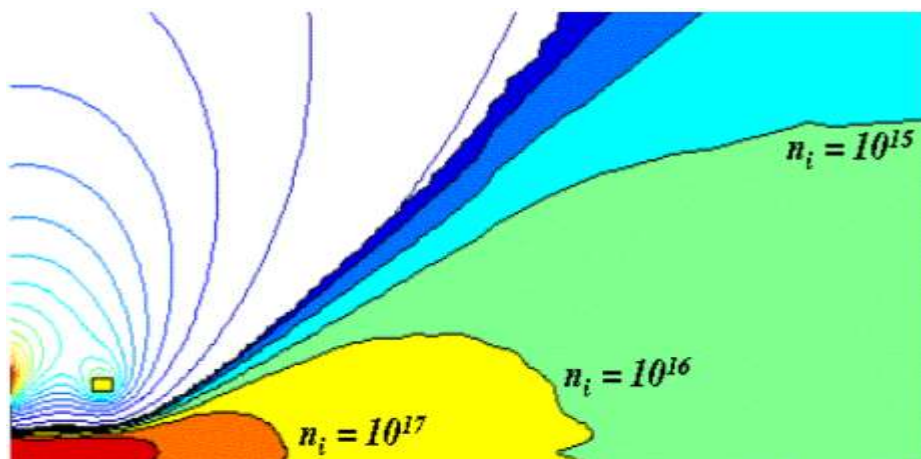
- Модель газодинамики;
- Решение кинетических уравнений Власова/Фоккера-Планка;
- Модель движения частиц



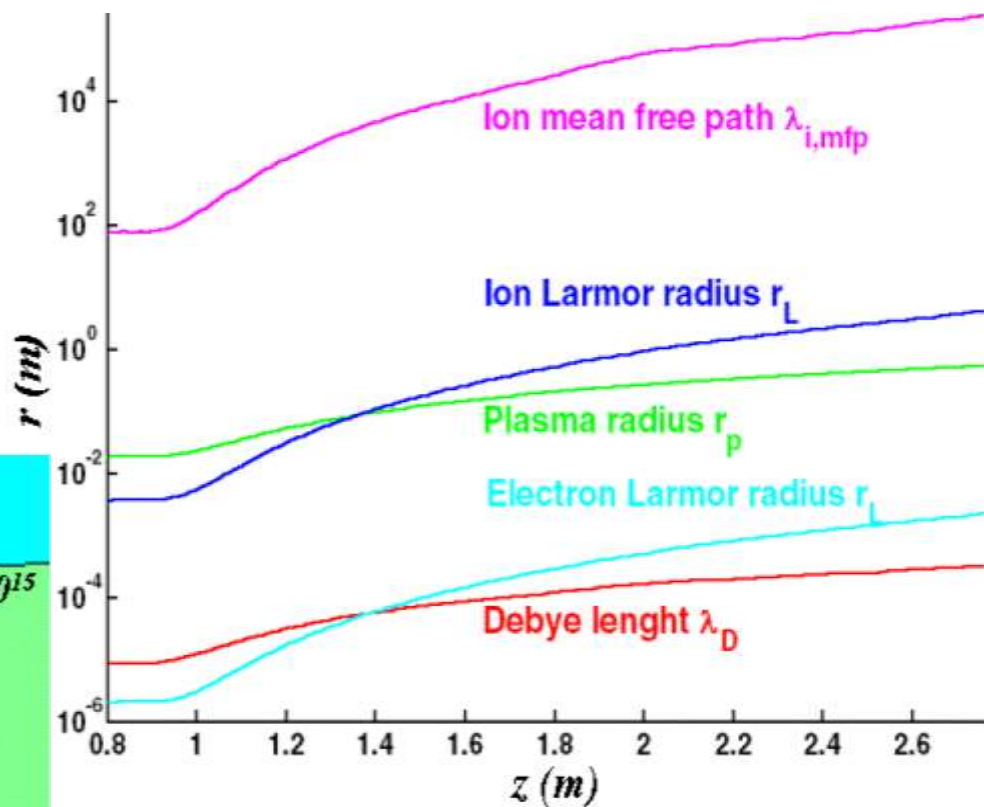
Геометрия VASIMR и магнитное поле для 24кВт варианта двигателя

Моделирование магнитных явлений

Для модели пульсационного плазменного двигателя в приближении холмовского двигателя использовались методы Монте-Карло и Particle-in-Cell (PIC).



Профиль плотности плазмы 24 kW VASIMR

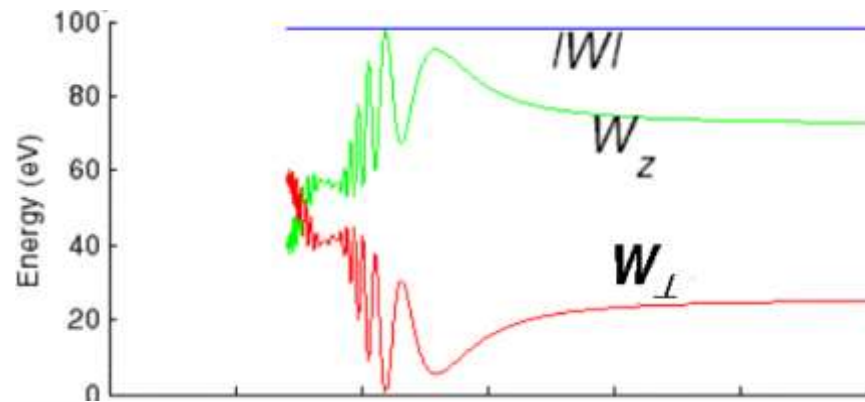
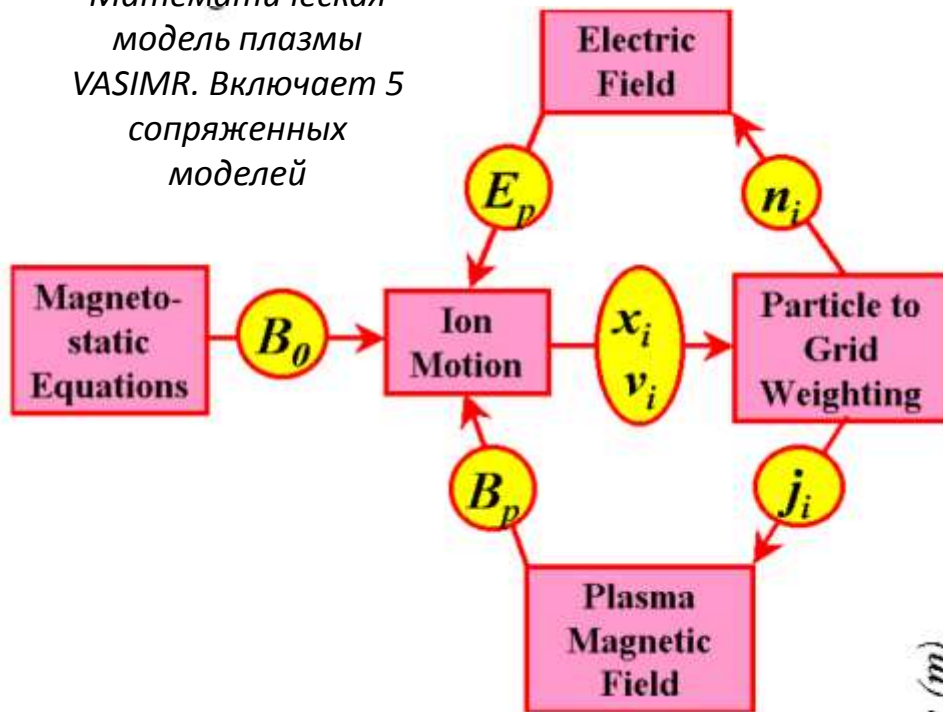


Масштабные длины

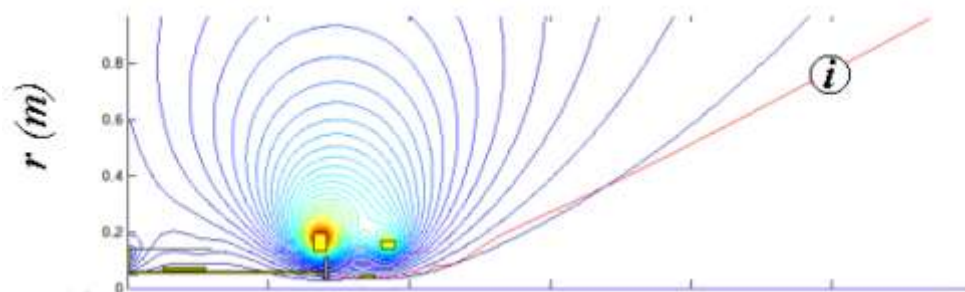
Результаты разработанного кода сравнивались с другими численными экспериментами, полученными при использовании других кодов расчета магнитной гидродинамики

Моделирование траекторий частиц плазменной струи

Математическая модель плазмы VASIMR. Включает 5 сопряженных моделей

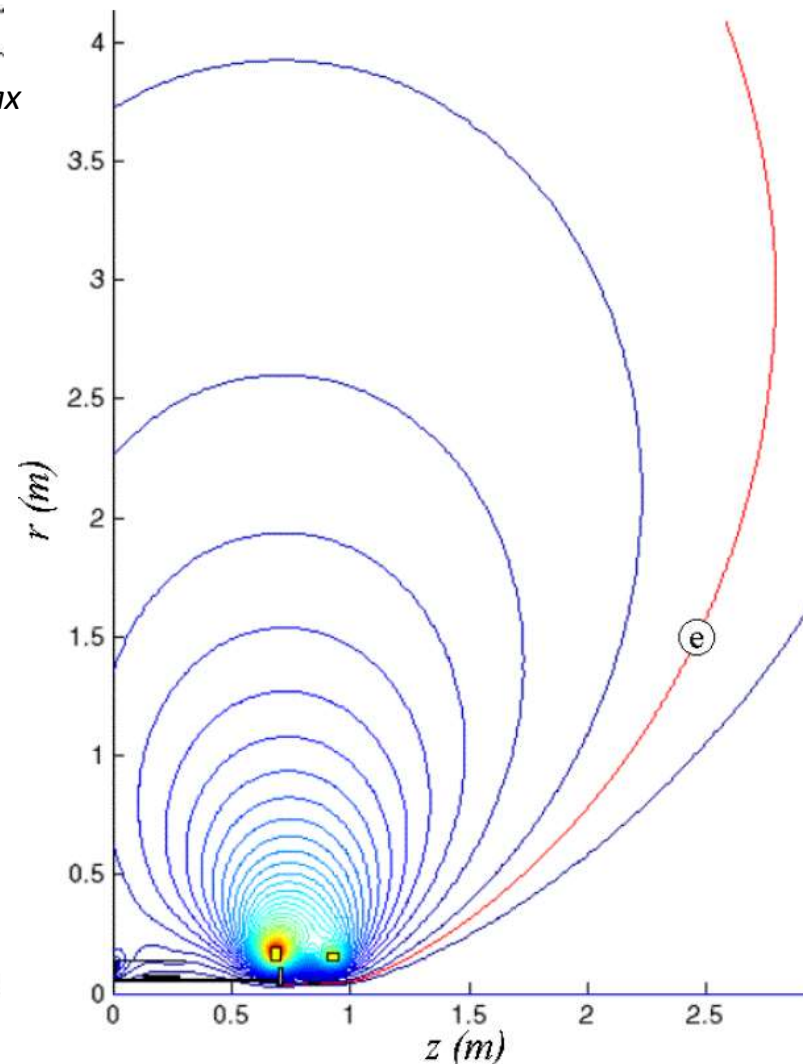
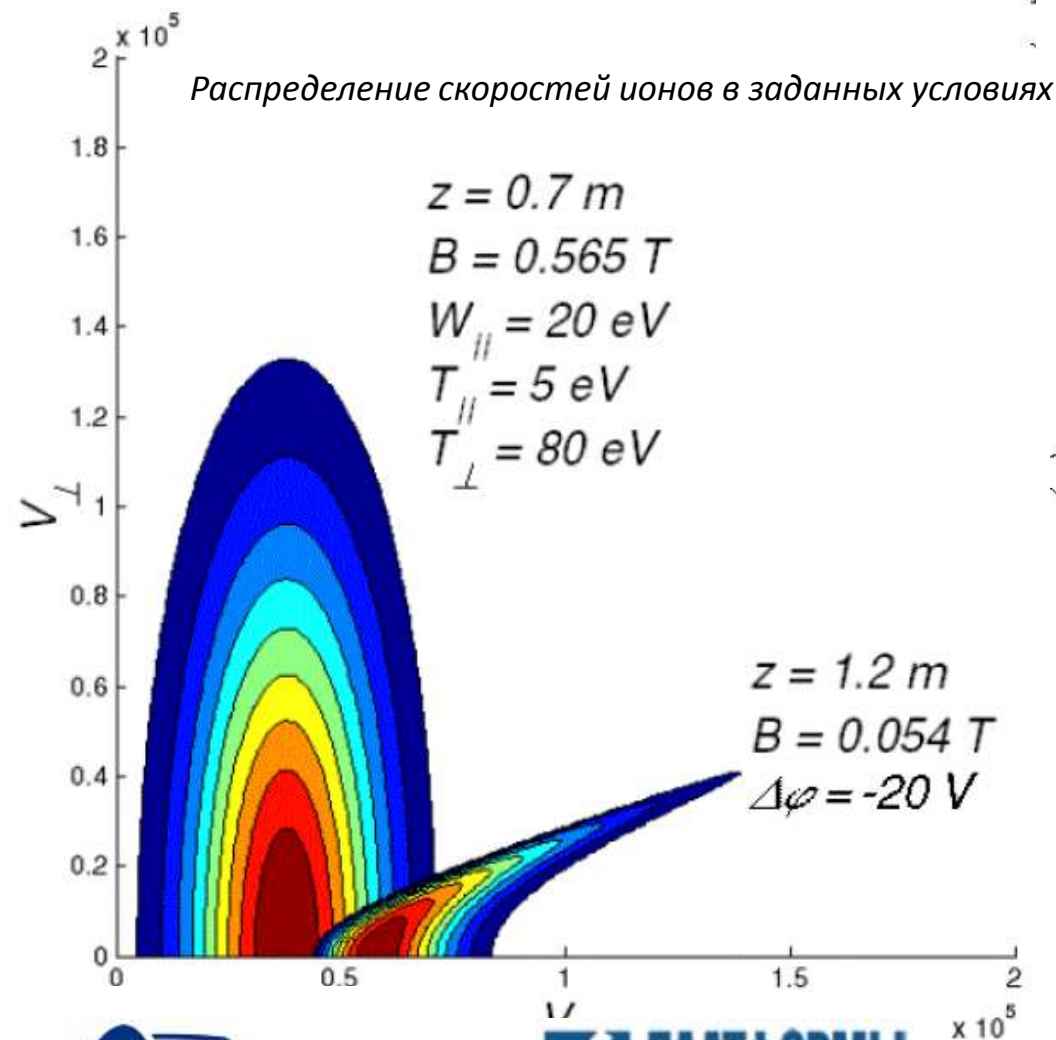


Полная, осевая и ортогональная энергии ионов



Магнитное поле и траектория ионов

Моделирование траекторий частиц плазменной струи

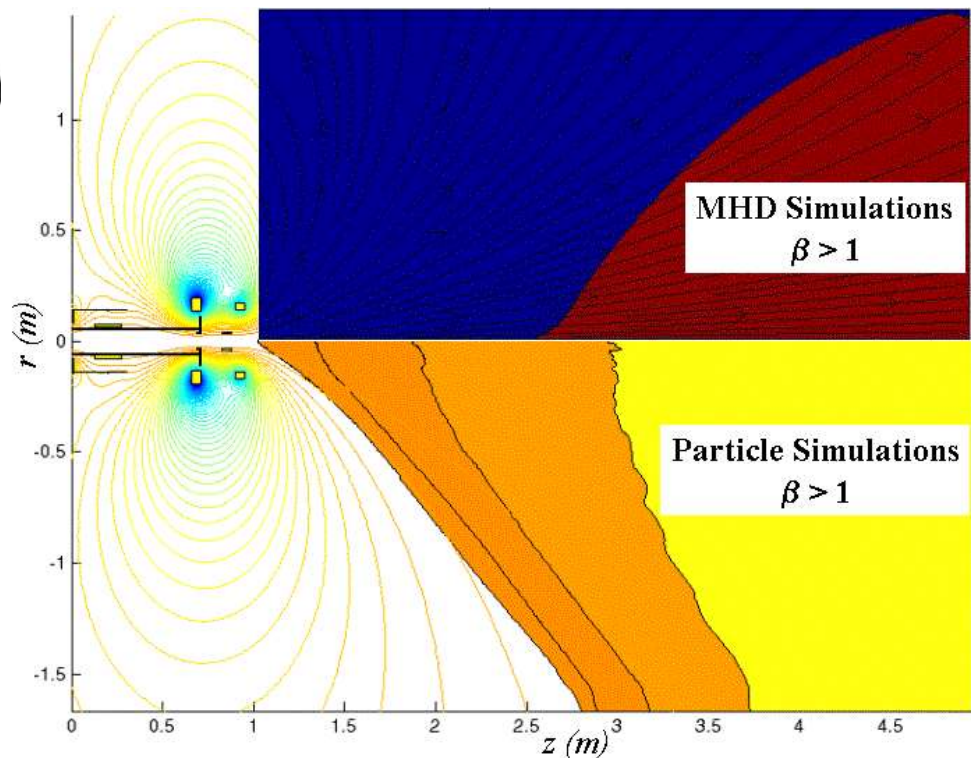
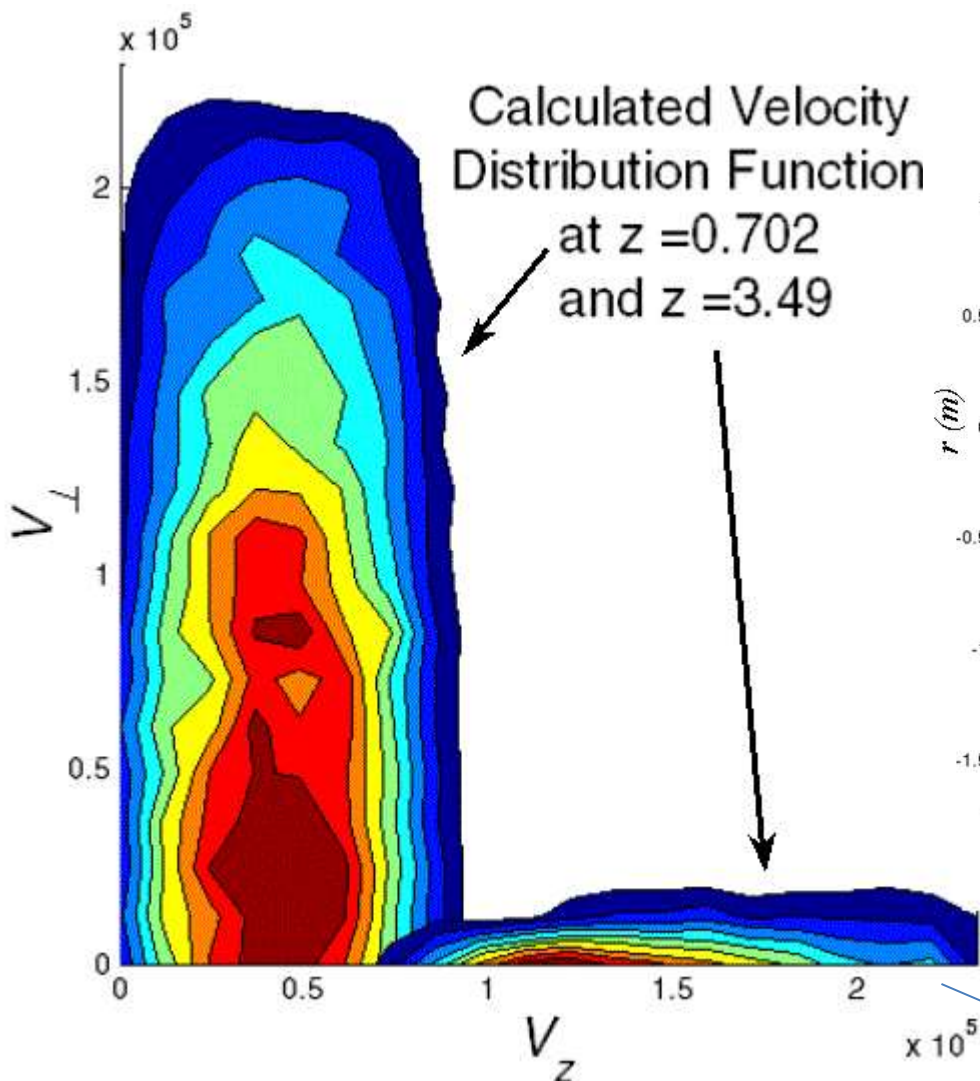


Магнитное поле и траектории ионов.
Наблюдается выход электрона



ВНИИА

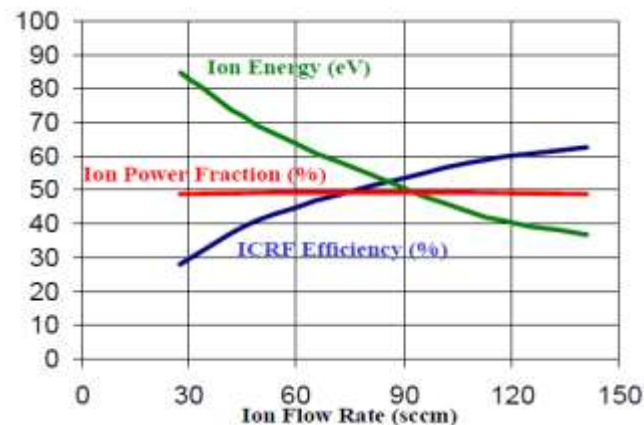
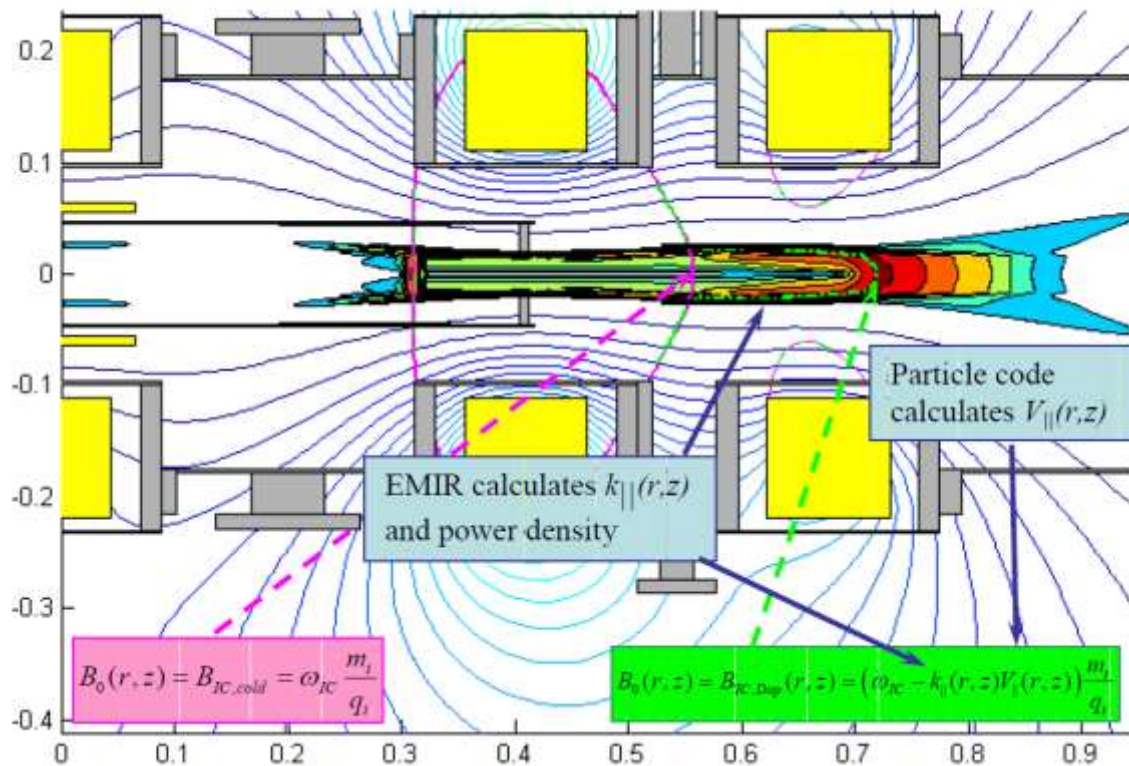




Сравнение профиля плазмы, полученного методом магнитной гидродинамики и методом частиц

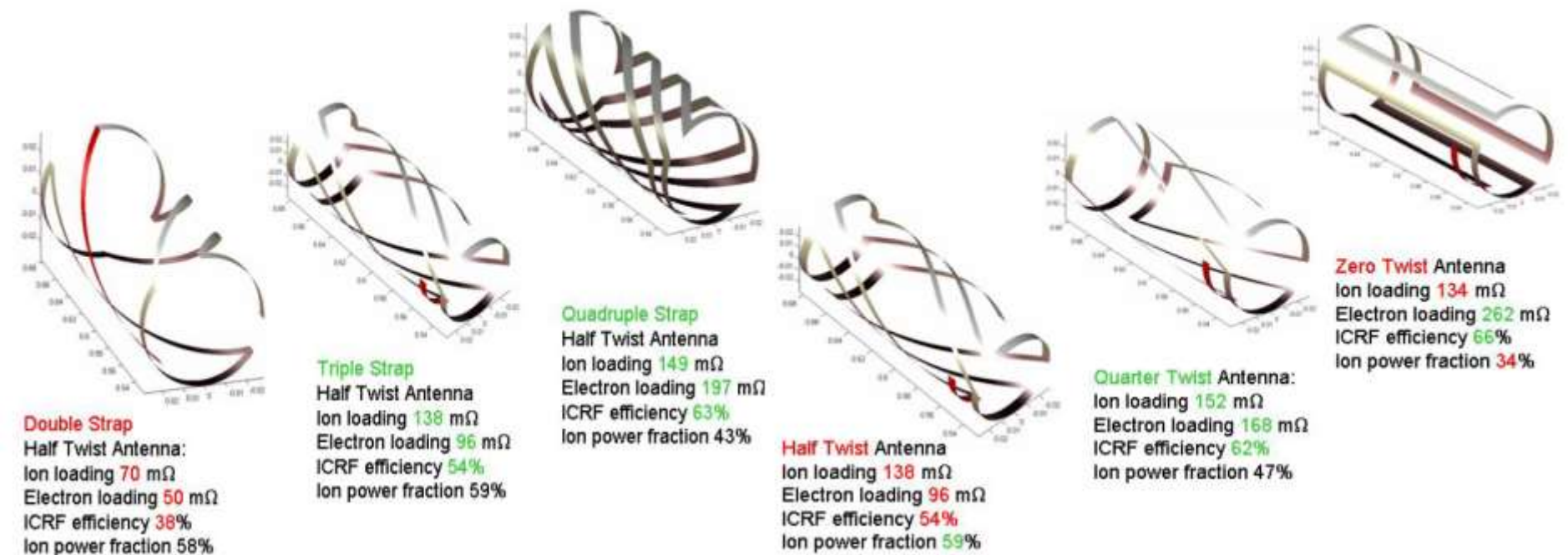
Вычисленное распределение скоростей ионов методом частиц. Наблюдается влияние магнитного сопла

В основе задачи лежит необходимость моделирования ускорителя плазмы в VASIMR. Численное моделирование проводилось в валидированном коде EMIR совместно с расчетами по методу частиц. Целью вычислений была задача оптимизации ICRF антенны (излучателя)



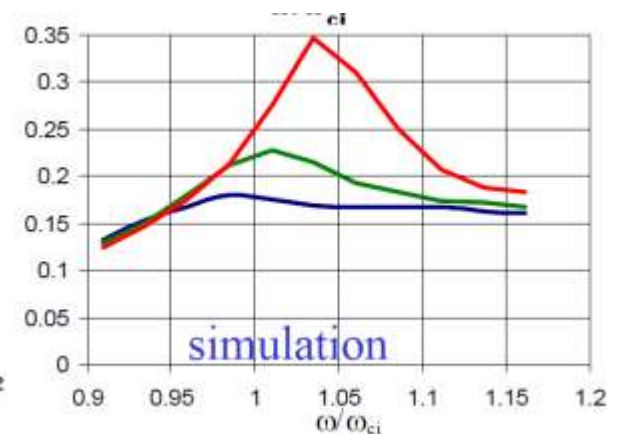
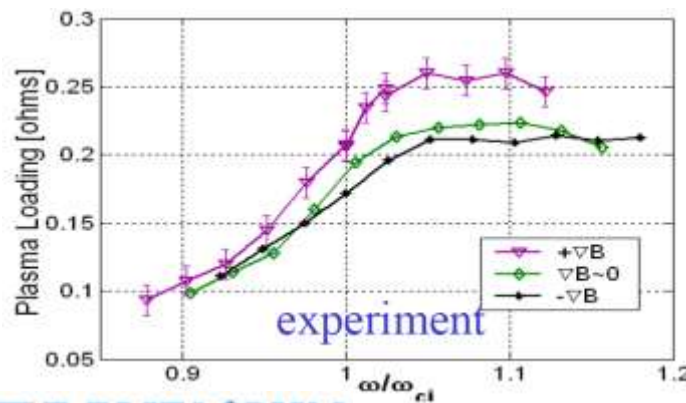
Эффективность ICRF в зависимости от плотности потока ионов

Поле магнитной индукции наложенной на поле плотности плазмы при влиянии ICRF антенны. Штрихованная линия показывает зону резонанса



Моделирование зависимости плотности потока плазмы от мощности и конфигурации ICRF

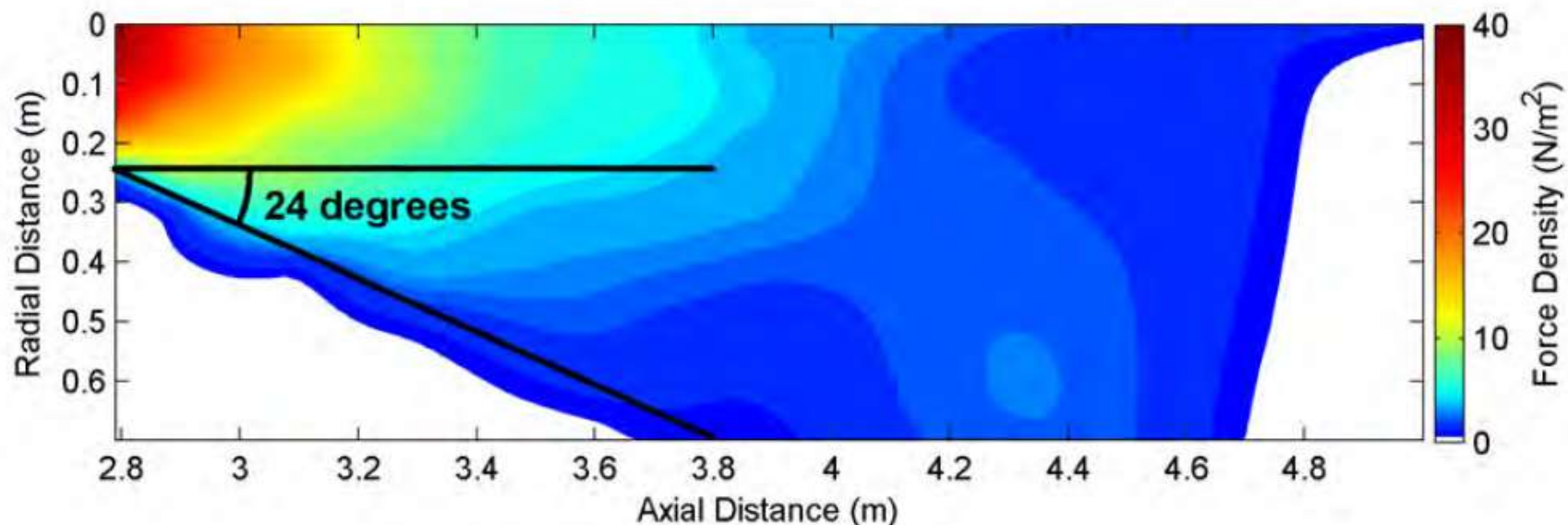
Расчет сопротивления плазмы возмущению ICRF, как функции магнитного поля антенны



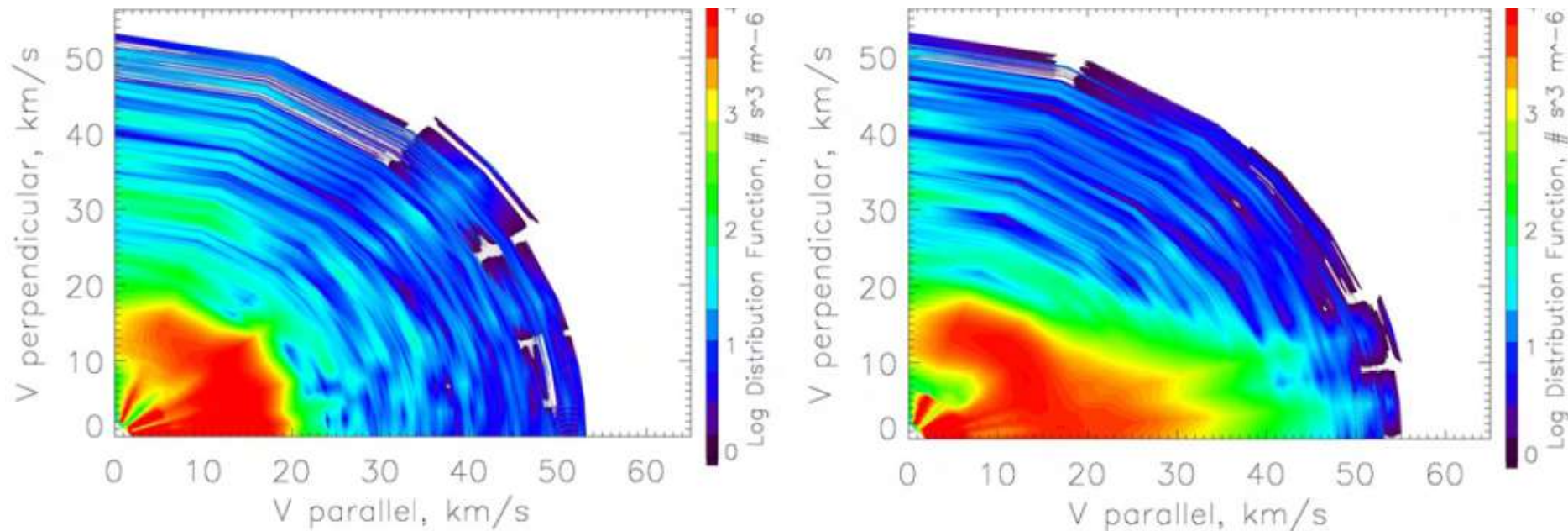
ВНИИА



Средняя ионная кинетическая энергия 12 eV от низкочастотной электромагнитной волны, которая возникает в некомпенсированной плазме, находящейся во внешнем постоянном магнитном поле определена из расчета течения плазмы и сил, возникающей у выхода из сопла



Действующая потока плазмы при радиочастотной мощности в 165 кВт и давлении 10e-4 torr и угле выхода 30

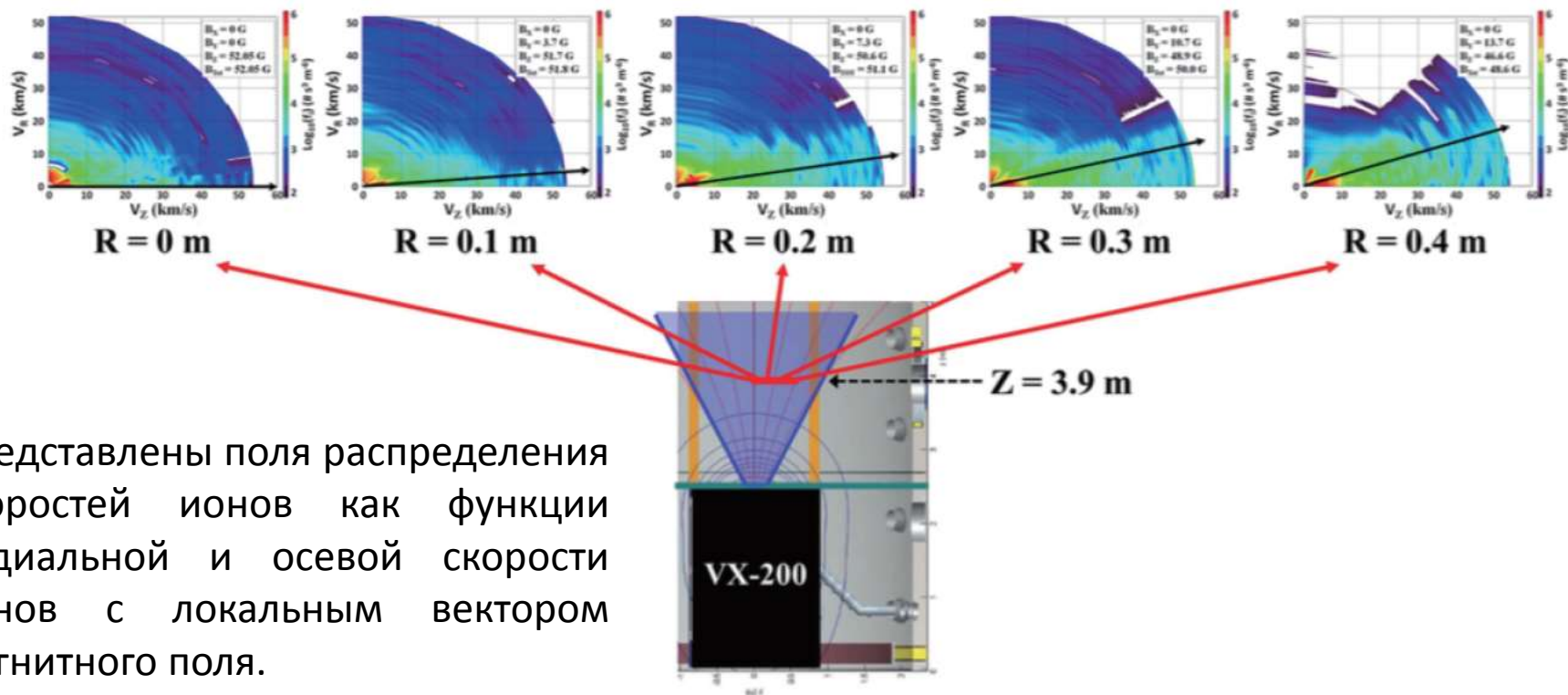


Поле распределения скорости ионов у оси на удалении 2х метров за выходом VX-200.

Слева – только низкочастотные возмущения. Справа – низкочастотные и ICRH возмущения

Компьютерная модель VASIMR для анализа эффективности была построена только на моделях фундаментальных процессов. По результатам вычислений, ожидается эффективность системы в целом в 50%-54% при импульсах в 3000-3500 сек. Максимально достигаемая сила 4.4 Н при 40% нагрузке.

Полуэмпирическая модель показывает, что возможно достичь 64% эффективности при импульсе 6000 сек и 200кВт.



Представлены поля распределения скоростей ионов как функции радиальной и осевой скорости ионов с локальным вектором магнитного поля.

Фактически, в больших радиальных зонах, где магнитное поле начинает отгибаться, аксиальная составляющая скорости ионов, является доминирующей по сравнению с магнитным вектором силы. Этот результат стал доказательством ионной немагнитизации и стал вторым индикатором определяющий отрыв плазмы.

В условиях специализации тематики расчетов, прикладные программные пакеты инженерного анализа в данной области не представлены широко. Превалируют собственные проприетарные коды исследовательских групп.

Некоторые известные пакеты численного моделирования :

1. EMIR - Модель газодинамики; Решение кинетических уравнений Власова/Фоккера-Планка; Модель движения частиц – particle-in-cell;
2. PSC – particle simulation code представляет собой современную объектно ориентированную массивную среду разработки для моделирования плазмы, лазерной плазмы, физики плотных полей в плазме и вакууме;
3. OSIRIS - трехмерный, основанный на полностью релятивистских частицах PiC код для моделирования плазменных ускорителей. Разработан на Fortran 90
4. Comsol – Модуль Plasma (Плазма) разработан специально для моделирования источников и систем низкотемпературной плазмы. Инженеры и ученые используют его для получения более ясного представления о физике разрядов и оценки рабочих характеристик существующих или возможных систем. Модуль позволяет проводить анализ в любом пространстве – одномерном, двумерном или трехмерном.
5. И др (QUICKPIC, UPIC-EMMA, IPROP, Synergia, OOPIC, Pegasus, H-VLPL, UPIC, Mayavi, Aztec, ML, dHybrid, VORPAL итп)



Название работы 2012	Млн. ядрочасов	Данных [ТБ]
Кинетические феномены магнитной гидродинамики и магнетизма	~ 10	~11
<i>SciDAC Project</i>	7	2
Кинетическое моделирование в лабораторной и космической плазмы	~8	~80
PiC моделирование плазмы для создания инертной энергии	~6	~25
Итп		
ВСЕГО за 2012 год	269	711

В 2014 года в лабораторию по изучению плазмы Ulisboa был установлен суперкомпьютер содержащий 1920 вычислительных ядер

Название работы 2017	Млн. ядрочасов
Задачи переноса массы и определение профиля	472
<i>SciDAC Project</i>	80
Моделирование плазмы и валидация экспериментальных моделей	200
Полностью интегрируемая модель	260
Кинетическое моделирование в лабораторной и космической плазмы	4147
Итп	
ВСЕГО за 2017 год	13332

Задачи на 1 шт.

Кол-во
вычислительных ядер

LHRF TORHL

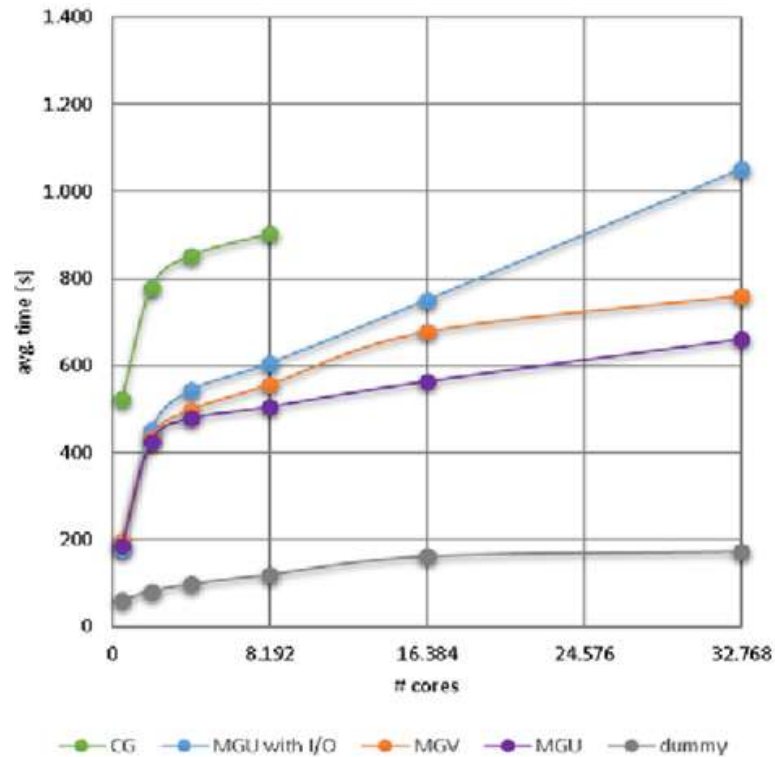
1 000- 8 000

Расчет по Фоккеру Планку ORBIT RF, sMC

~10 000

Моделирование антенн VORPAL

4 000 – 30 000



ВНИИА



Зарубежные вычислительные мощности

- Моделирование VASIMR в основном проводится на вычислительных мощностях Oak Ridge National Laboratory (ORNL);
 - ORNL сегодня обладает вычислительными ресурсами превышающими 225 Пфлопс;
 - ORNL обладатель суперкомпьютеров с 1991 года.
-
- Минимальный расчетный цикл задачи (проекта) требует ~10000 ядер в день для научной группы по данным на 2017 г. (слайд 18);
 - рассчитанная величина коррелирует с возможностями ПО (слайд 19)
-

Тогда возможно определить минимальные требования к аппаратному вычислителю на основе минимальных возможностей ПО **(от 2017 г.): ~1000 ядер (от 35 млн. руб.)**

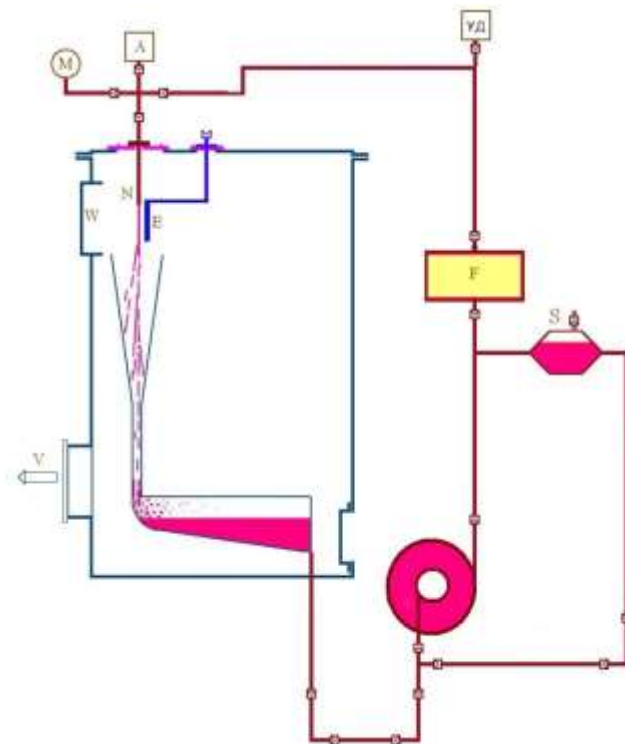
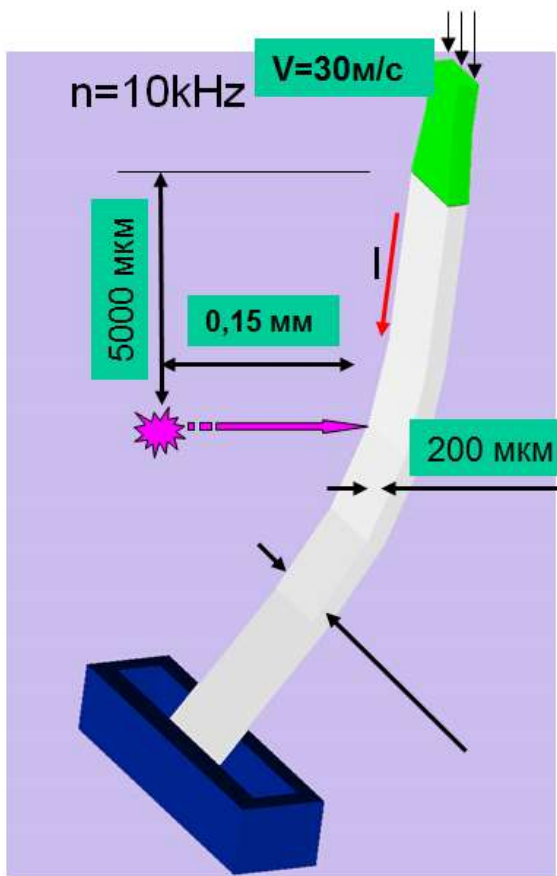
Тогда требования к аппаратному комплексу на основе возможностей ПО **(от 2017 г.)** и требований проектов: **~4000 ядер (от 400 млн. руб.)**

Тогда требования к аппаратному комплексу на основе возможностей ПО и требований проектов **(на 2012 г.): от 680 ядер (от 25 млн. руб.)**

Проект по численному моделированию течения эвтектики под воздействием лазерных импульсов (ИС РАН, МГУ, МГИУ, НИЦЭВТ, СИНЦ) 2008 г.

~ 20 человеколет (как 1 из 2-3 проектов лаборатории)

~ 3.2 млн.ядрочасов в год (от НРС кластер от **15 млн. руб.**)

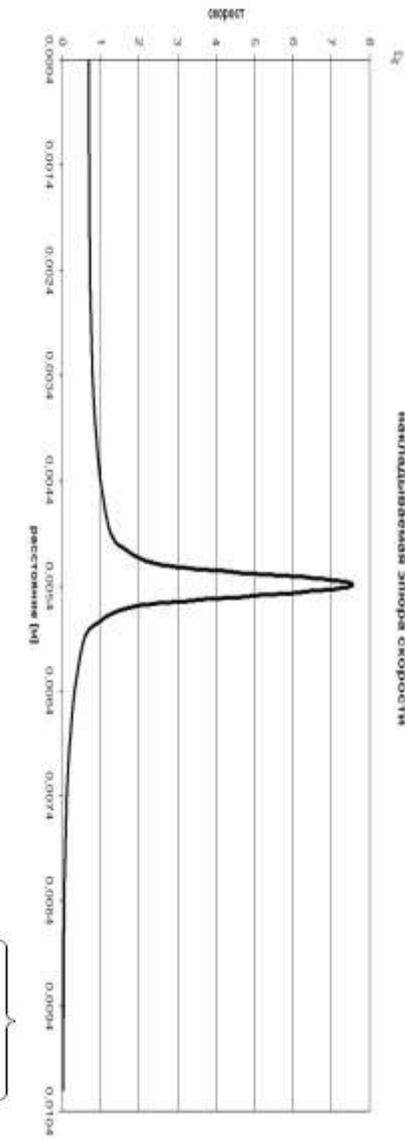
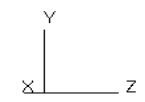
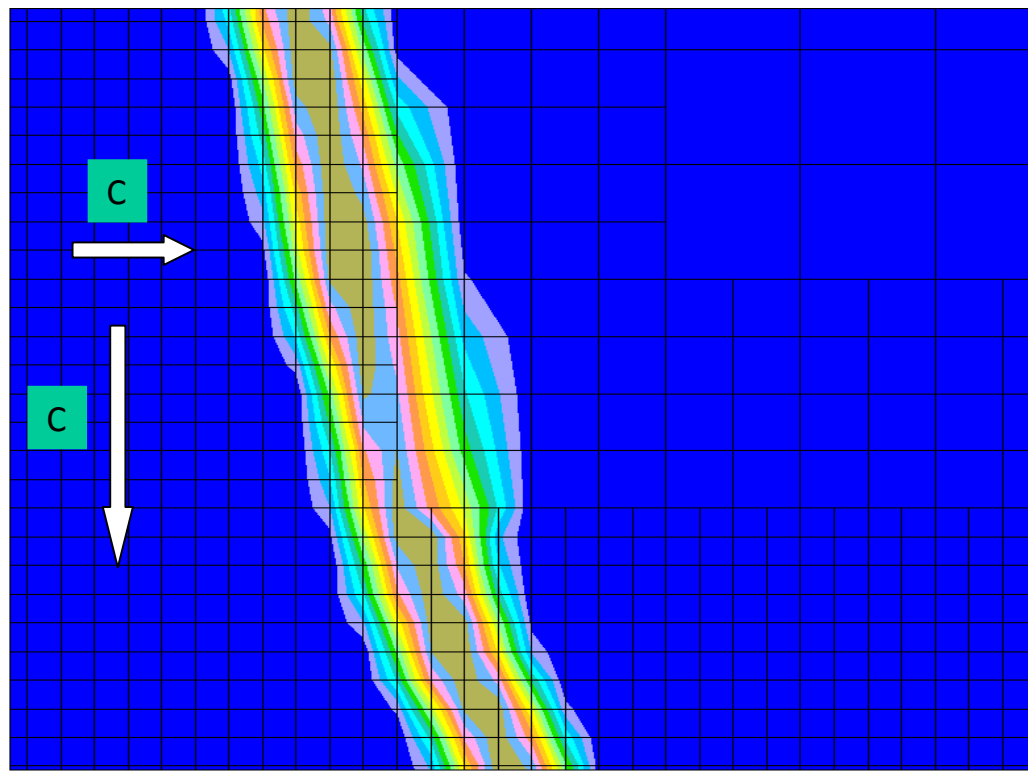
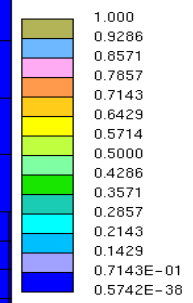


ВНИИА





TIME = 0.200001E-04
 LOCAL MX= 1.000
 LOCAL MN= 0.5742E-38



Оценка воздействия импульса плазменного потока

Оценка воздействия импульса лазерной абляции

Оценка воздействия электромагнитного импульса

$$\Delta V_x = \begin{cases} \Delta V_x = \frac{0,53}{\left[1 + 0,44 \cdot 10^6 \cdot (L - y)^2\right]^{\frac{3}{2}}} + \frac{6,36}{\left[1 + 0,44 \cdot 10^8 \cdot (L - y)^2\right]^{\frac{3}{2}}} + \left\{ \begin{array}{l} 0,67, \quad -L < y < 0 \\ 0, \quad y < -L \end{array} \right\}, C \geq 0,5 \\ \Delta V_x = 0, C < 0,5 \end{cases}$$

СПАСИБО

Литература:

1. Analysis of Plasma Detachment through Magnetic Nozzle via Canonical Field Theory, Yu Takagaki, 2017
2. VASIMRR Performance Results, AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit 25 - 28 July 2010, Nashville, TN, Leonard D. Cassady, Benjamin W. Longmiery, Chris S. Olseny, Maxwell G. Ballengery, Greg E. McCaskillz, Andrew V. Ilinx, Mark D. Carter, Tim W. Gloverk, Jared P. Squire and Franklin R. Chang Dazyu
3. И др.