

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана



XVII Международная конференция
«ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ»

19–23 мая 2025 г. Снежинск

Импульсные радиационно-магнитогазодинамические схемы для мощных электрофизических и энергетических установок

В.В. Кузенов, С.В. Рыжков

НУК «Энергомашиностроение»

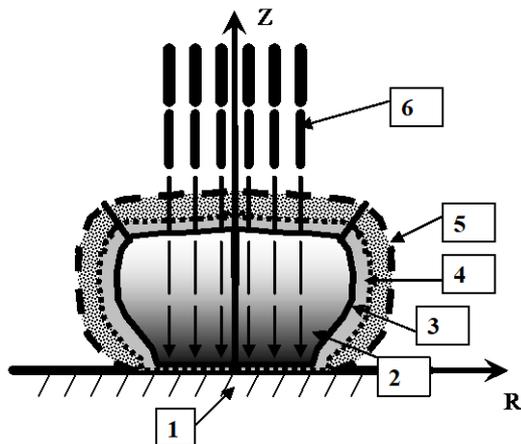
МГТУ им. Н.Э. Баумана

E-mail: svryzhkov@bmstu.ru

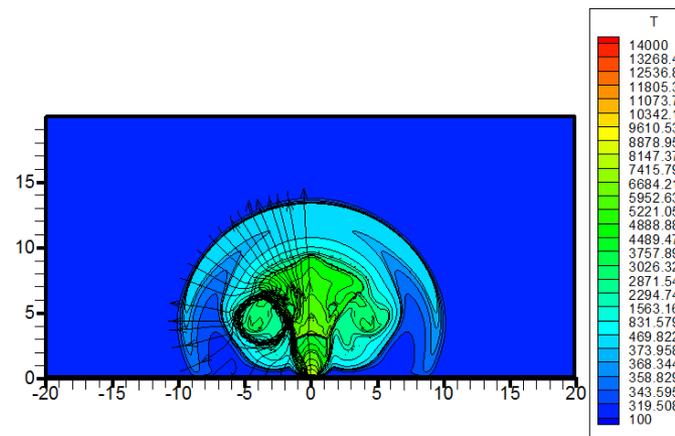
Импульсные радиационно– магнитогазодинамические (РМГД) системы

- **Импульсные РМГД системы** – высокояркостные плазменные источники излучения и генераторы ударных волн (А.Ф. Александров, А.А. Рухадзе, 1974), системы магнитно-инерциального термоядерного синтеза (МИТС) (I.R. Lindemuth, I.R. Kirkpatrick, 1983; A. Hasegawa et al., 1983; С.Ф. Гаранин, 2012; Э.А. Азизов и др., 2001; В.А. Гасилов, С.В. Захаров, В.П. Смирнов, С.Ю. Гуськов, Н.В. Змитренко и др., 2018), плазменные ускорители (Л.Я. Минько, 1970; А.И. Морозов, 2006; А.И. Васин, А.С. Коротеев, А.С. Ловцов и др., 2012), импульсные плазмодинамические системы управления высокоскоростными потоками газа, а также системы плазменно-стимулированного поджига и горения топливных смесей и т.д.
- Важный вклад в изучение физических процессов, протекающих в импульсных РМГД системах, внесли исследования, выполненные Ю.П. Райзером, А.И. Морозовым, А.Ф. Александровым, А.А. Рухадзе, В.Е. Фортовым, С.Т. Суржиковым, В.Б., Розановым, А.М. Андриановым, В.С. Камельковым, И.Б. Тимофеевым, Л.Я. Минько, К.Л. Степановым и др.

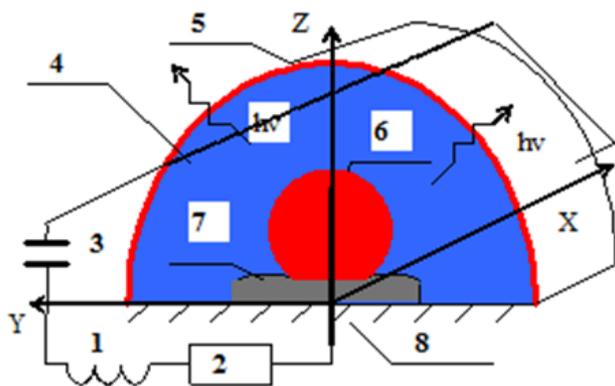
Моделирование плазмогазодинамических процессов в импульсных РМГД системах и их практические приложения



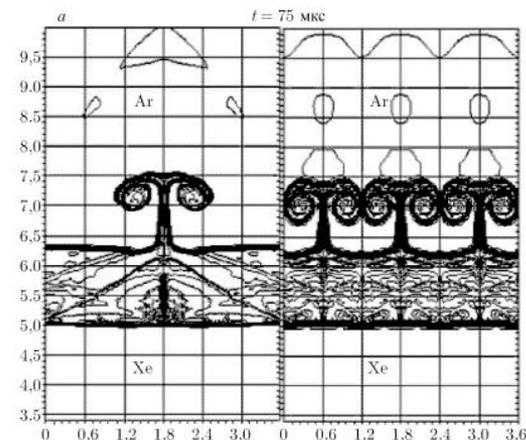
Плазменно-лазерное стимулирование перемешивания и горения



Изучение физики долгоживущих, излучающих, плазменных образований



Изучение физических процессов в генераторе ударных волн (УВ) и широкополосного теплового излучения



Исследование процессов перемешивания в системах магнито-инерциального синтеза (МИТС)

GLOBAL FUSION PRIVATE COMPANIES MAP

PRESENTED BY 

United States



A grid of 24 fusion company logos from the United States, arranged in three rows and eight columns. The logos include: AVALANCHE, BLUE LASER FUSION, CFS, ELECTRIC FUSION SYSTEMS, EXO FUSION, HELICITY SPACE, HELION, HORNE TECHNOLOGIES, HYPERJET FUSION CORPORATION, LaserFusionX, LONGVIEW FUSION ENERGY SYSTEMS, LPPFUSION, MIFTI, nearstar FUSION, NK, Princeton FUSION SYSTEMS, REALITY FUSION, SHINE, STELLAREX, tae, THEA ENERGY, TYPE ONE ENERGY, XCIMER, and ZAP ENERGY.

Canada



Logos for generalfusion and fuse.

Great Britain



Logos for CROSSFIELD, Tokamak Energy, and first light.

Germany



Logos for FOCUSED ENERGY, GAUSS FUSION, Proxima Fusion, and MarvelFusion.

Japan



Logos for EX-Fusion, Helical Fusion, and KYOTO FUSIONERING.

Italy



Logo for DEUTELIO.

France



Logo for RENAISSANCE FUSION.

Sweden



Logo for NOVATRON.

Israel



Logo for nT-tao.

Australia



Logo for HB11 ENERGY LASER BORON FUSION.

New Zealand



Logo for OPENSTAR TECHNOLOGIES LTD.

China



Logo for ENN 新奥.

EXPERIMENTS on γ -RAY and NEUTRON SOURCES

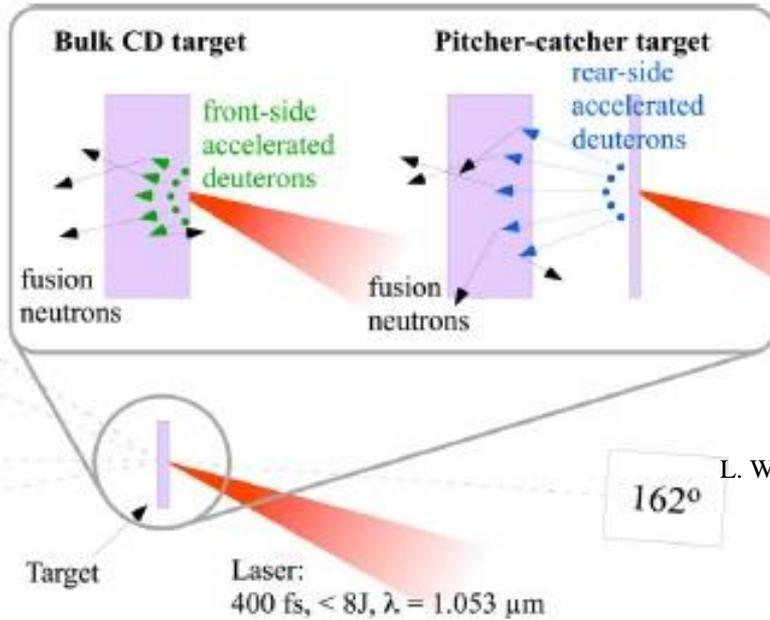
Pitcher-Catcher scheme

University of Michigan, Naval Research Laboratory

Отличие схемы “Pitcher-Catcher” от классической схемы - ускорение нейтронов происходит с другой поверхности мишени.

For laser intensities in the range of $(1-3) \cdot 10^{19} \text{ W/cm}^2$, it was found that the bulk targets produced a high yield ($5 \cdot 10^4$ neutrons per steradian) beamed preferentially in the laser propagation direction.

L. Willingale, et al., Phys. Plasmas **18**, 083106 (2011)



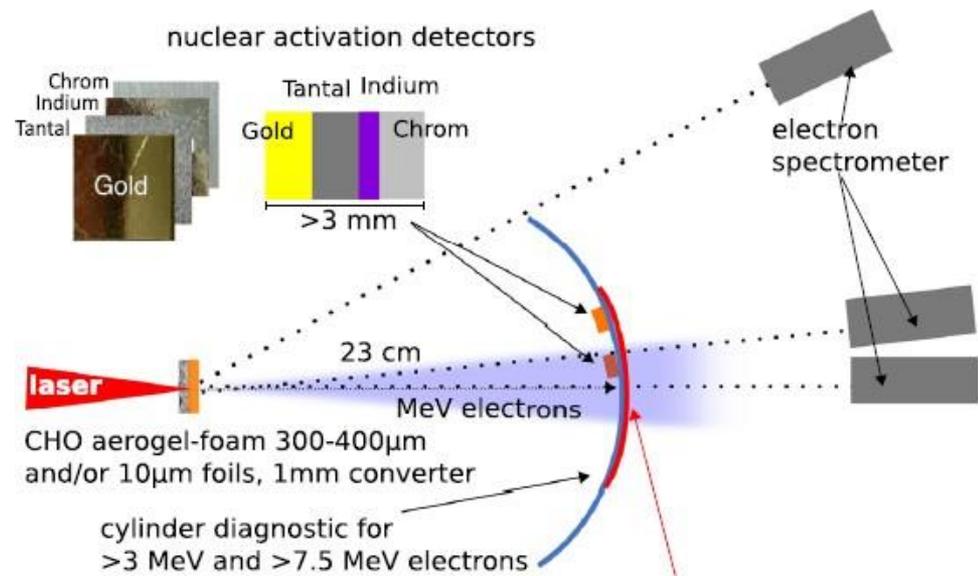
Direct laser acceleration (DLA)

in the presence of strong quasi-static electric and magnetic fields

(ultra-high power multi-petawatt lasers operating around 10^{23} W/cm^2 intensities.)

Multi-MeV beams of photons more than 10^{12} ph/sr and an ultra-high intense neutron source with greater than 6×10^{10} neutrons per shot with a pre-ionized polymer foam with near-critical electron density (NCD) plasma at 10^{19} W/cm^2

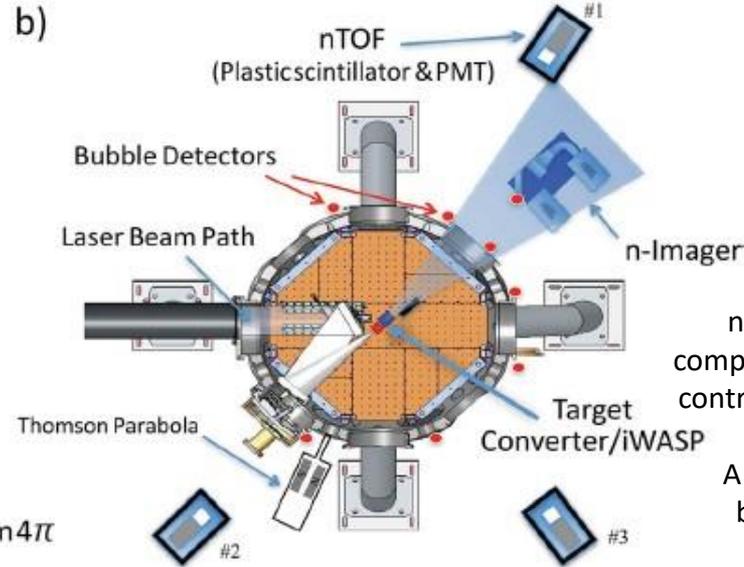
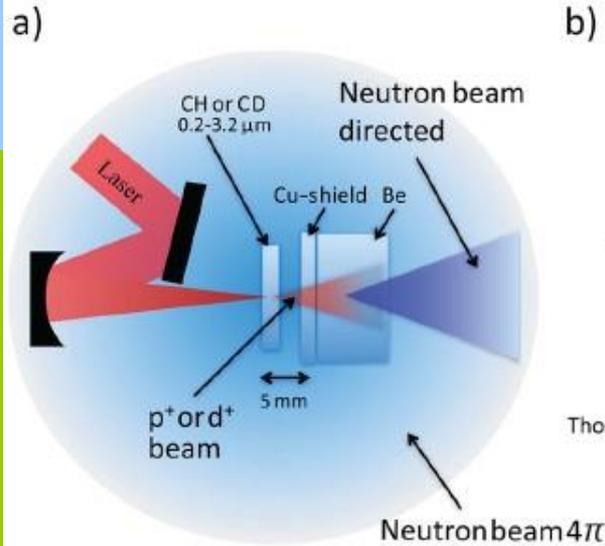
Darmstadt, Moscow, Düsseldorf



M. Günther, et al., Nature comm. **13**, 170 (2022)

ION, ELECTRON and NEUTRON SOURCES

200 TW LANL Trident laser facility



High-energy short-pulse (HESP) lasers are more compact than accelerator systems, has been established to excite intense ion beams, mainly protons. A typical ion acceleration scheme using short-pulse lasers is the so-called target normal sheath acceleration (TNSA).

The emission of neutrons is a superposition of an isotropic component into 4π and a forward directed, jet-like contribution, with energies ranging up to 80 MeV.

A maximum flux of $4.4 \cdot 10^9$ neutrons/sr has been observed and used for fast neutron radiography.

D. Jung, et al., Phys. Plasmas **20**, 056706 (2013)

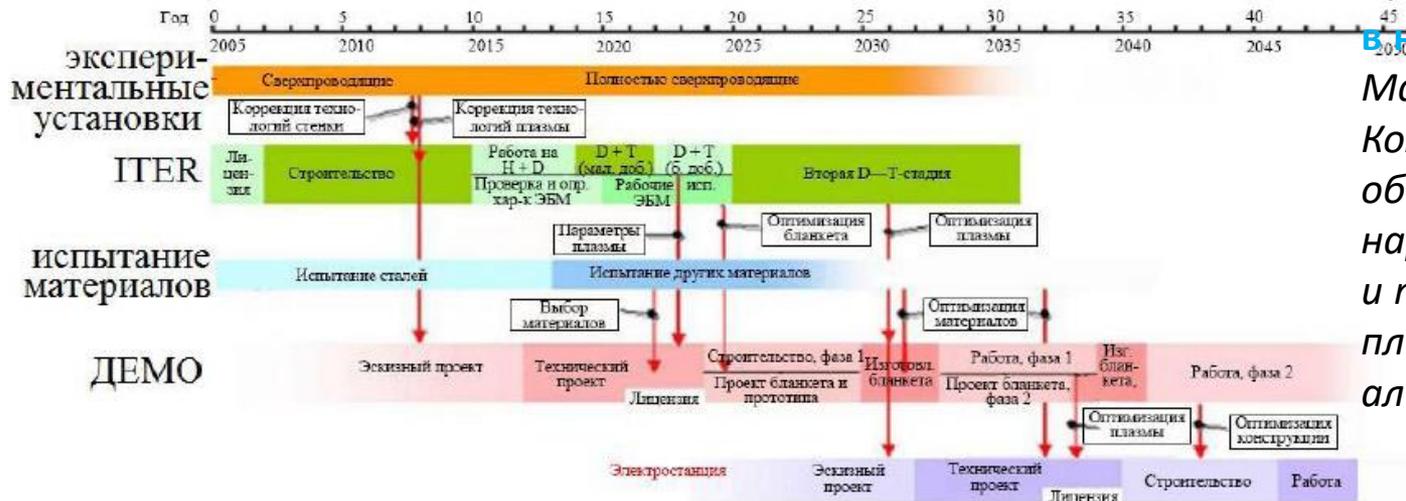
Ионный пучок в схеме TNSA обычно имеет "гауссово" распределение с пиком энергии и потока в центре пучка, а ионный пучок, генерируемый в режиме BOA (break-out afterburner), формируется 2D и 3D динамикой во время релятивистской прозрачной фазы взаимодействия, управляющей ускорением.

Direct laser acceleration (DLA) works effectively in near-critical electron density (NCD) plasma and with a picosecond laser pulse duration. Unlike laser wakefield acceleration (LWFA), DLA does not generate very high-energy electrons, but produces a sufficient number of electrons with Maxwell-Boltzmann like distribution. The interaction of a large number of accelerated DLA electrons with high-Z materials causes an ultrahigh energy density of MeV radiation, which can cause nuclear reactions leading to the formation of neutrons.

ОСНОВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ УТС:

токамак с D–T-топливом («чистый» реактор)

Термоядерная энергетика – КОГДА?



Открытые системы более энергоэффективны, термоядерная установка на их основе может быть **в несколько раз компактнее**. Магнитная конфигурация компактный тор может объединить лучшие наработки в физике и технике плазмы. Один из плюсов — использование альтернативных топлив.

Наработка трития (breeder):

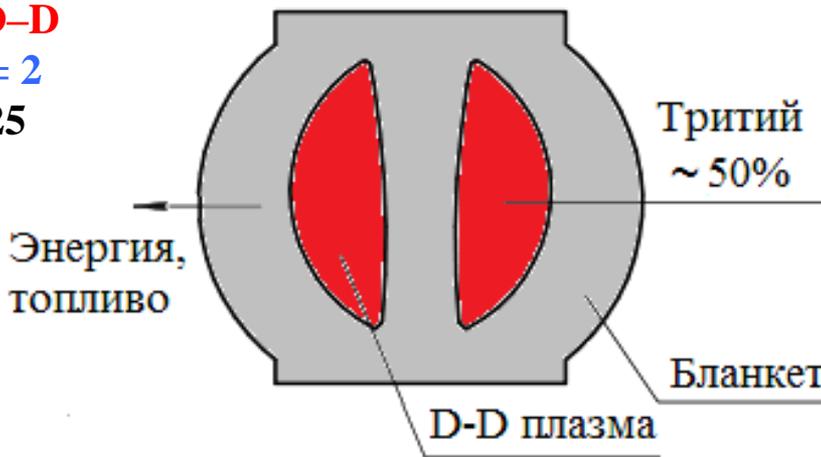
Топливо D–D

$a \approx 2 \text{ м}, A = 2$

$Q = 0.2..0.25$

$\eta_{\text{net}} = 5$

$\eta^* \approx 0.12$



Tritium burner:

Топливо D–T

$a \approx 1 \text{ м}, A = 3$

$Q = 2..3$

$\eta_{\text{net}} = 5$

$\eta^* \approx 0.3$

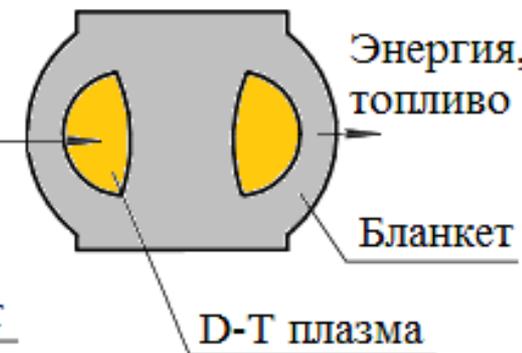
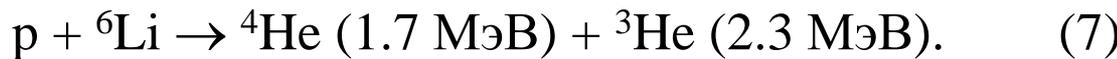
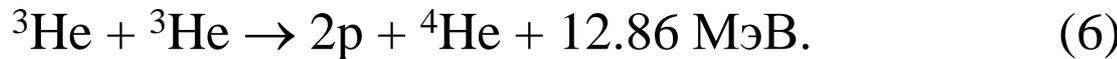
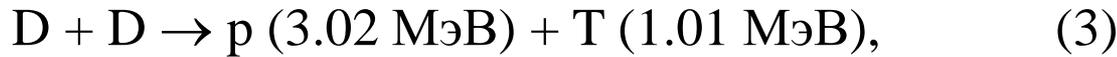
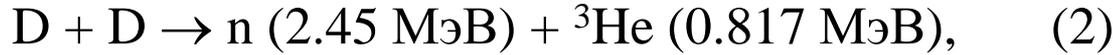
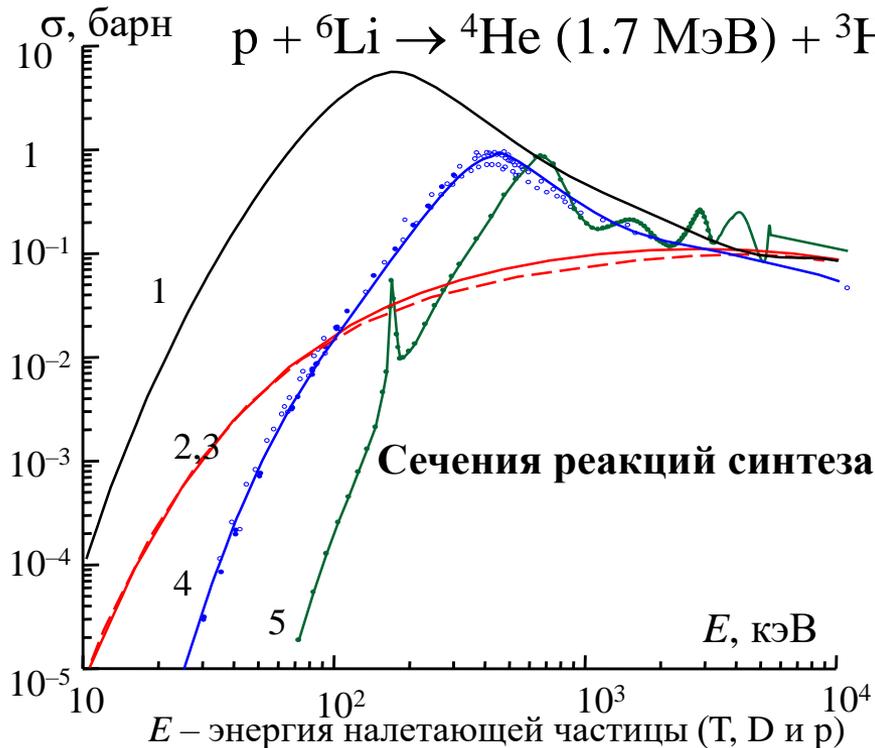


Рис. Схема топливного цикла гибридной системы на основе токамаков

Реакции синтеза, представляющие наибольший интерес



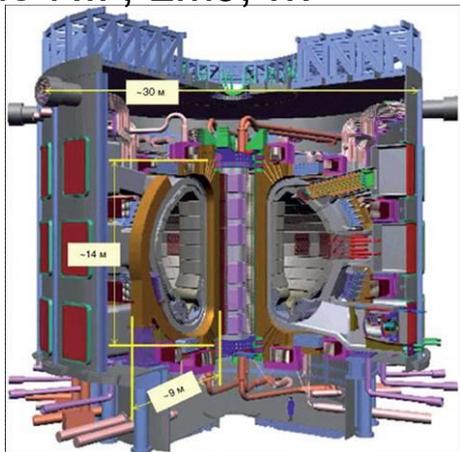
Малорадиоактивные
(безнейтронные)
реакции (5-7)



Топливный цикл	Радиоактивное топливо	Прямая радиоактивность	Наведенная радиоактивность
$D-T$	T	n	n, T
$D-D$	-	n, T	n
$D-{}^3\text{He}$	-	-	n, T
${}^3\text{He}-{}^3\text{He}$	-	-	-
$p-{}^6\text{Li}$	-	-	n, T, ${}^7\text{Be}$, ${}^{11}\text{C}$
$p-{}^{11}\text{B}$	-	-	n, ${}^{14}\text{C}$

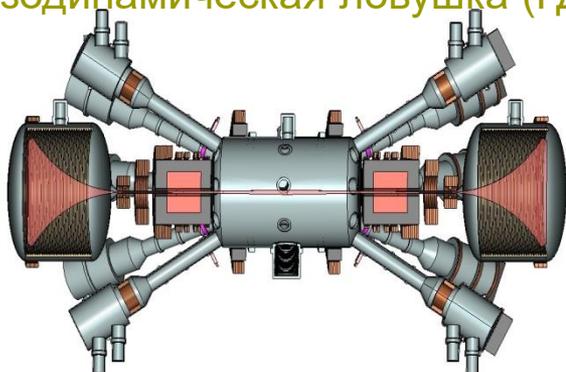
Концептуальные термоядерные проекты = нейтронный источник + гибридный реактор

ИТЭР, Демо NIF, LMJ, ...



$R/a = 6.2 \text{ м} / 2 \text{ м}$, вытянутость 17 м

Газодинамическая ловушка (ГДЛ)



A. Ivanov et al. OS-2010, FS&T 59 (2011)

Термоядерный источник нейтронов на основе ГДЛ – субкритический дожигатель минорных актинидов

Straight field line mirror (SFLM)

Линейная магнитная ловушка для уничтожения ядерных отходов и производства энергии



Fig. Entire coil set for an SFLM mirror machine

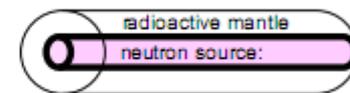
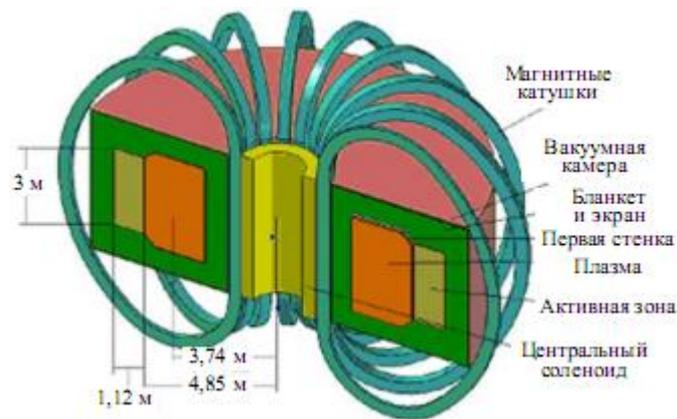


Fig. Scheme for transmutation of nuclear waste

O. Agren. OS-2010, FS&T 59 (2011)

Субкритический газоохлаждаемый реактор Gas-Cooled Fast Transmutation Reactor GCFT-3



Stacey W.M. et al. GA 30332-0425 (2006)



Магнитно-инерциального термоядерный синтез (МИТС): термины

МАГО/MAGO: Предложено в РФЯЦ-ВНИИЭФ. В США аббревиатура используется для взрывных генераторов
A.M. Buyko et al. Proc. IX IEEE International Pulsed Power Conf. (1993)

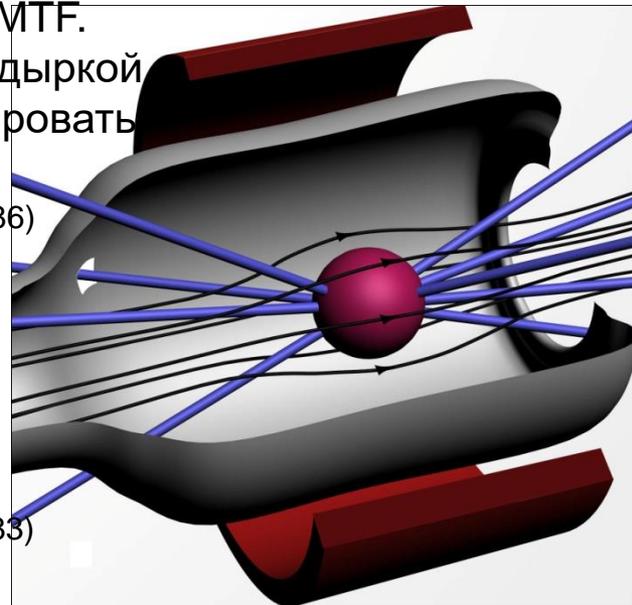
MICF/MIIF - один из форм MIF/MTF.
Сферический хольраум ИТС с дыркой позволяет убегающим е генерировать сильное В поле
A. Hasegawa et al. Phys. Rev. Lett. 56. (1986)

MTF – общий термин, используемый с 1960-ых г.г. для замагниченной мишени проводящим лайнером
I.R. Lindemuth, Nuclear Fusion 23 (1983)

Идея раздельного сжатия и инициирования термоядерных реакций другим источником
Л.П. Феоктистов. Горизонты ЛТС (1985)

Генерация мегагауссных полей - при воздействии на плазму мощных потоков лазерного излучения возникают сверхсильные магнитные поля $B > 100$ Тл

Схема лазерного термояда с магнитным полем



Импульсный соленоид создает начальный магнитный поток

После наводки магнитного поля (МП) - лазерные пучки

МП сжимается и создает динамическое давление на мишень изнутри, разогревая ее до сверхвысоких Т

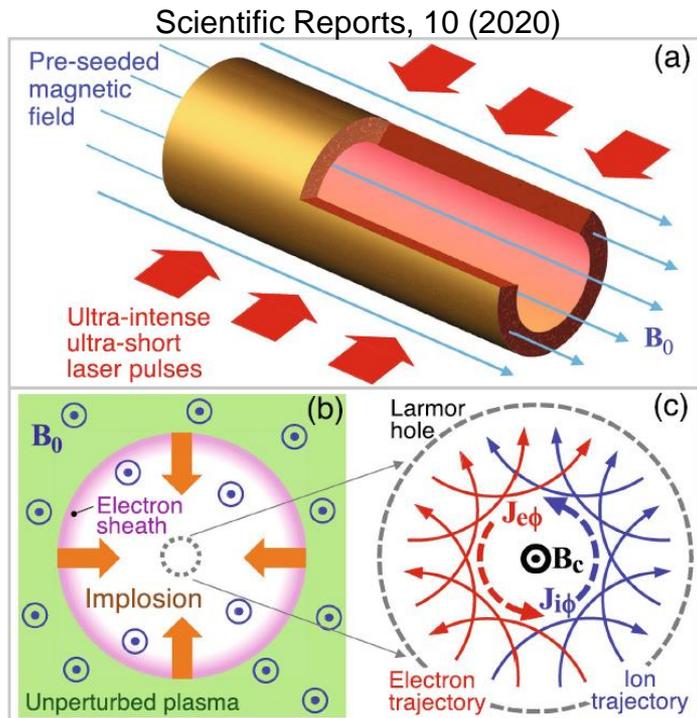
Плотность магнитного потока, создавая сверхсильное МП

100-kT mf generation using paisley targets by femtosecond laser-plasma interactions

Zosa et al, Appl. Phys. Lett. 120 (2022)

Micro-scale fusion in dense relativistic nanowire array plasmas
Up to 2×10^6 fusion neutrons/J in D-D fusion reactions

Curtis et al, Nature Commun. 9 (2018)



Generation of megatesla magnetic fields by intense-laser-driven microtube implosions

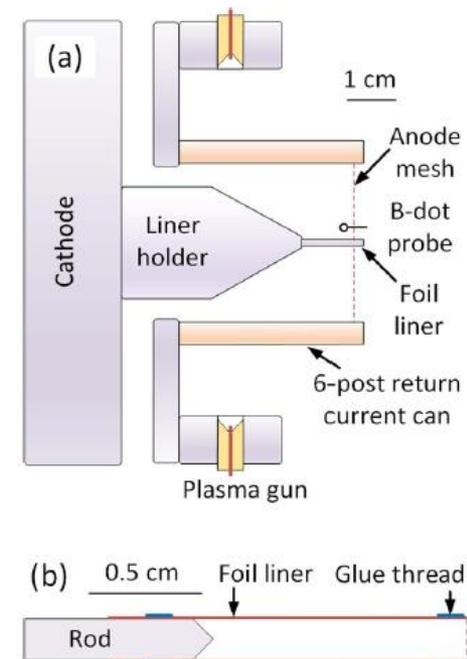
M. Murakami^{1,2}, J. J. Honrubia², K. Weichman³, A. V. Arefiev³ & S. V. Bulanov^{4,5}

A microtube implosion driven by ultraintense laser pulses is used to produce ultrahigh magnetic fields. Due to the laser-produced hot electrons with energies of mega-electron volts, cold ions in the inner wall surface implode towards the central axis. By pre-seeding uniform magnetic fields on the kilotesla order, the Lorentz force induces the Larmor gyromotion of the imploding ions and electrons. Due to the resultant collective motion of relativistic charged particles around the central axis, strong spin current densities of \sim peta-ampere/cm² are produced with a few tens of nm size, generating megatesla-order magnetic fields. The underlying physics and important scaling are revealed by particle simulations and a simple analytical model. The concept holds promise to open new frontiers in many branches of fundamental physics and applications in terms of ultrahigh magnetic fields.

Magnetic implosion of thin aluminum foil liners

На генераторе МИГ (многоцелевой импульсный генератор) в ИСЭ СО РАН даже при существующих параметрах (2 МА) возможно достижения термоядерного синтеза при условии быстрого (~ 5 нс) сжатия ДТ мишени тяжелым лайнером.

S.A. Sorokin, *Plasma Phys. Control. Fusion* 64 (2022)



Fusion Neutron Source

IOP Publishing

Plasma Physics and Controlled Fusion

Plasma Phys. Control. Fusion 61 (2019) 014018 (11pp)

<https://doi.org/10.1088/1361-6587/aad699>

Acceleration of protons and deuterons up to 35 MeV and generation of 10^{13} neutrons in a megaampere deuterium gas-puff z-pinch

D Klir¹, A V Shishlov^{2,3}, V A Kokshenev², P Kubes¹, K Rezac¹, S Buryskova^{1,4}, R K Cherdizov², J Cikhardt¹, B Cikhardtova¹, G N Dudkin³, J T Engelbrecht⁵, F I Fursov², S L Jackson⁵, J Krasa⁴, J Kravarik¹, N E Kurmaev², V Munzar¹, V N Padalko³, N A Ratakhin^{2,3}, O Sila¹, K Turek⁶, V A Varlachev³ and R Wagner⁶

¹Czech Technical University in Prague, 166 27 Prague 6, Czechia

²Institute of High Current Electronics SB RAS, 634055 Tomsk, Russia

³National Research Tomsk Polytechnic University, 634050 Tomsk, Russia

⁴Institute of Physics, ASCR, 182 21 Prague 8, Czechia

⁵Plasma Physics Division, US Naval Research Laboratory, Washington, DC 20375 United States of America

⁶Nuclear Physics Institute, ASCR, 18086 Prague, Czechia

E-mail: kirdani@fel.cvut.cz

Received 30 June 2018, revised 21 August 2018

Accepted for publication 23 August 2018

Published 14 November 2018



Abstract

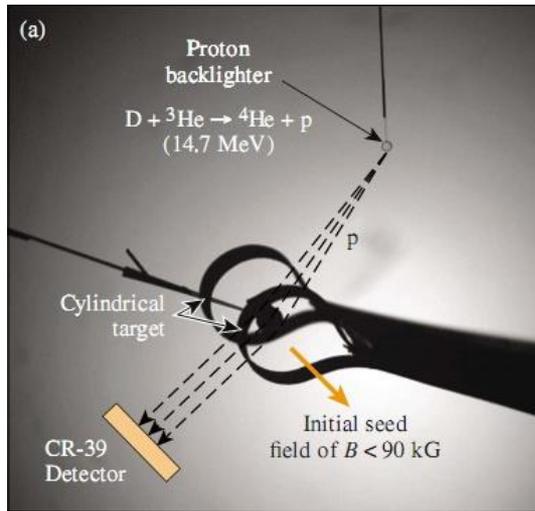
The acceleration of hydrogen ions up to 35 MeV is observed in the z-pinch experiments on the GIT-12 generator at a 3 MA current and 0.6 MV driving voltage. High ion energies are obtained with a novel configuration of a deuterium gas-puff z-pinch. In this configuration, a hollow cylindrical plasma shell is injected around an inner deuterium gas puff to form a homogeneous, uniformly conducting layer between electrodes at the initial phase of z-pinch implosion. The stable implosion at the velocity up to 650 km s^{-1} is important to deliver more current onto the z-pinch axis. Magnetohydrodynamic instabilities become apparent first at stagnation. After the disruptive development of $m = 0$ instabilities, $\sim 20 \text{ ns}$ pulses of high-energy photons, neutrons, electrons, and ions are observed. The average neutron yield is 2×10^{12} . The ion emission is characterized by various diagnostic techniques including those based on the usage of neutron-producing samples. When a large neutron-producing sample is placed onto the axis below a cathode mesh, the neutron yield is increased up to $(1.1 \pm 0.3) \times 10^{13}$. Considering a $\sim 130 \text{ kJ}$ energy input into z-pinch plasmas and magnetic field, this implies the neutron production efficiency of $\sim 10^8$ neutrons per one Joule of the z-pinch energy.

В нашей работе дана оценка плазмодинамических параметров цилиндрической мишени МИТС для комбинированной схемы воздействия интенсивных потоков энергии. Показана возможность создания генераторов нейтронов на основе комбинированной схемы воздействия (число нейтронов на единицу длины $N_{fus} \approx 0.5 \cdot 10^{15}$ н/см к моменту времени окончания воздействия). В данной работе не учитывается влияние несимметрии при расчете сжатия мишени, что может приводить к различию в наблюдаемом выходе нейтронов (в два порядка) от предсказаний одномерных расчетов. Из сказанного также следует, что учет не одномерности физических процессов и вопросов, связанных с гидродинамическими неустойчивостями (возникающие в процессе сжатия мишени), из которых основную роль играют неустойчивости Рэля-Тейлора и Рихтмайера-Мешкова, требует дальнейшего отдельного подробного изучения.



MIF/MTF experiments

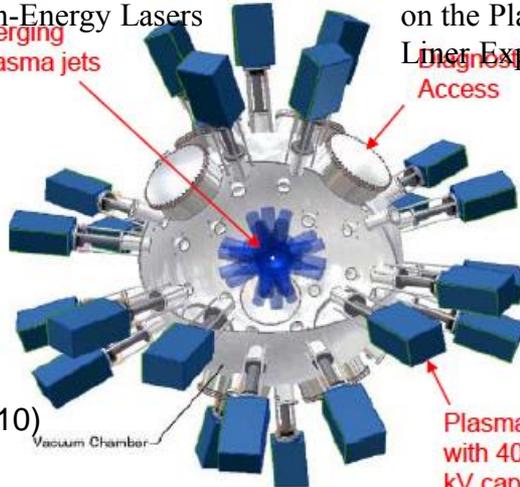
The MTF approach is currently being studied primarily by the VNIIEF, LANL, AFRL, SNL, HyperV, Roch.U, UW, General fusion, etc.



Knauer et al, Phys Plasmas, 056318 (2010)

Rochester Univ. -
Compressing
Magnetic Fields with
High-Energy Lasers

Merging
plasma jets



LANL - PLX

First plasma
on Sept. 13, 2011
on the Plasma
Liner Experiment

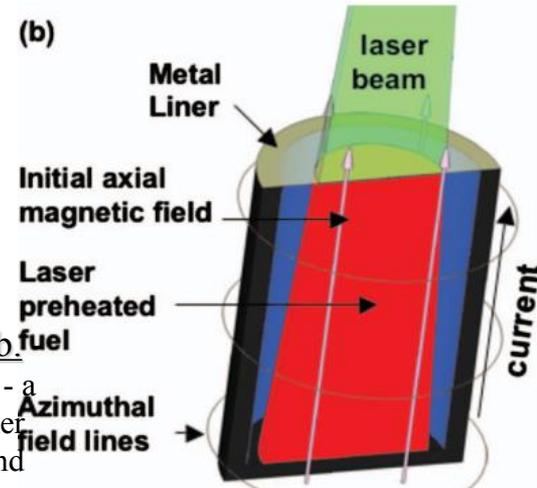
Diagnostic
Access

Sandia Nat Lab.

MagLIF concept - a
blowup of the liner
with preheated and
magnetized fuel
before implosion

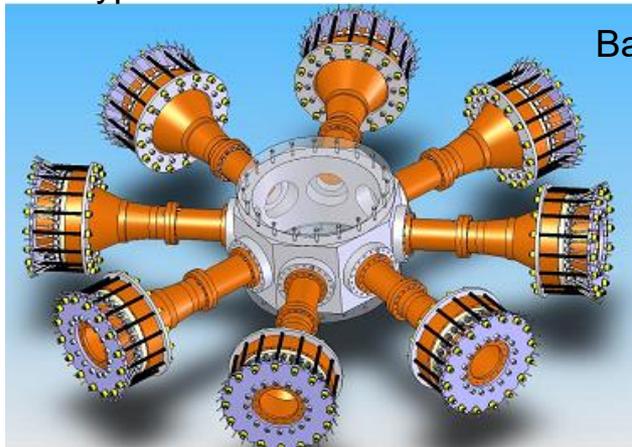
Plasma guide
with 40 μF, 6k
kV capacitors

(b)



Slutz et al, PoP 17, 056303 (2010)

HyperV Plasma Jet accelerator

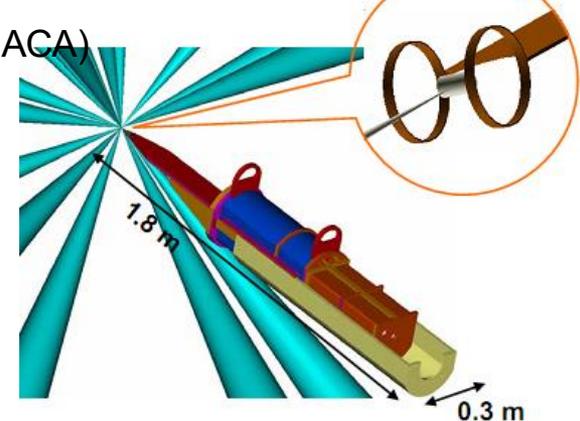


F.D. Witherspoon, Plas Jet Workshop (2008)

Вакуумная камера диаметром 2,74 м (HACA)



OMEGA EP device – D-3He reaction



O.V. Gotchev et al. JFE 27 (2008) 13

ИТС с взрывомагнитными генераторами

МАГО (РФЯЦ – ВНИИЭФ), МОЛ - ТРИНИТИ (Троицк) + НИИЭФА

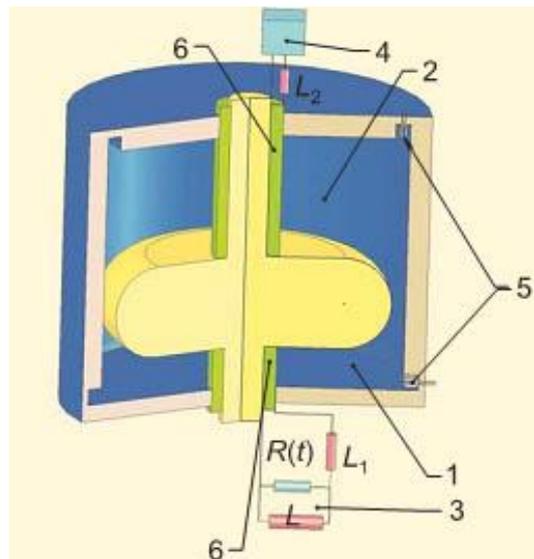
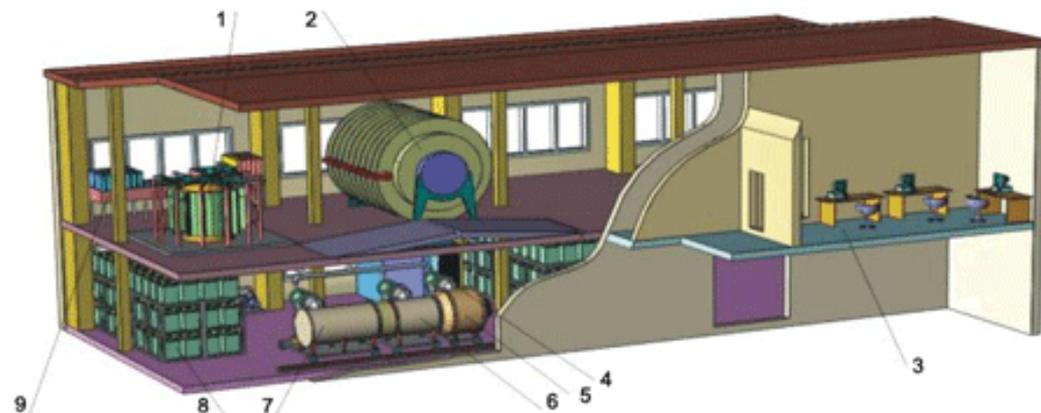
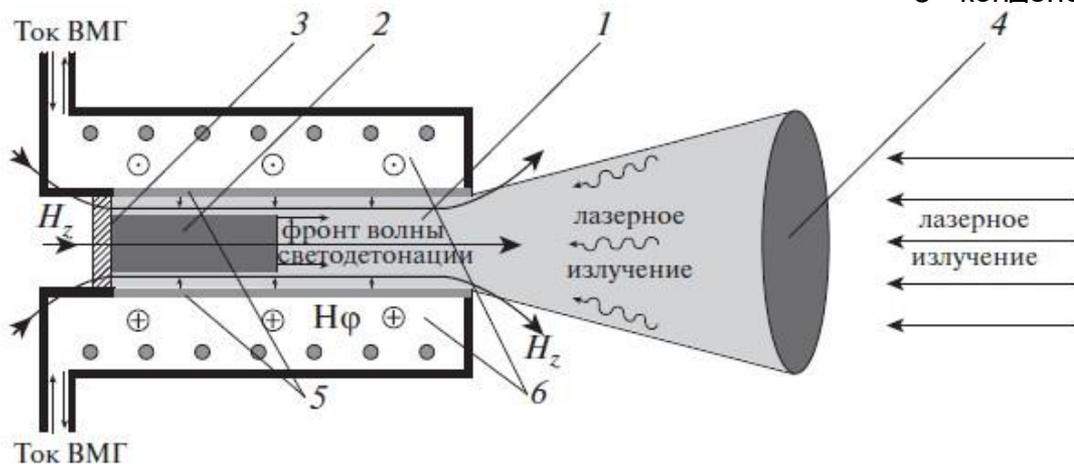


Схема плазменного генератора МАГО.

1, 2 — плазменная камера; 3, 4 — источники питания, взрывомагнитные генераторы, 5 — датчики, 6 — изоляторы



1 - магнитный усилитель, 2 - индуктивный накопитель, 3 - пультная, 4 - вакуумная система, 5 - плазменный прерыватель тока, 6 - повышающий трансформатор напряжения, 7 - магнитный компрессор, 8 - конденсаторная батарея, 9 - блок коммутации 2-ой ступени
<http://niiefa.spb.ru/res/stc/mit/RUS/Ass/Ass2.htm>



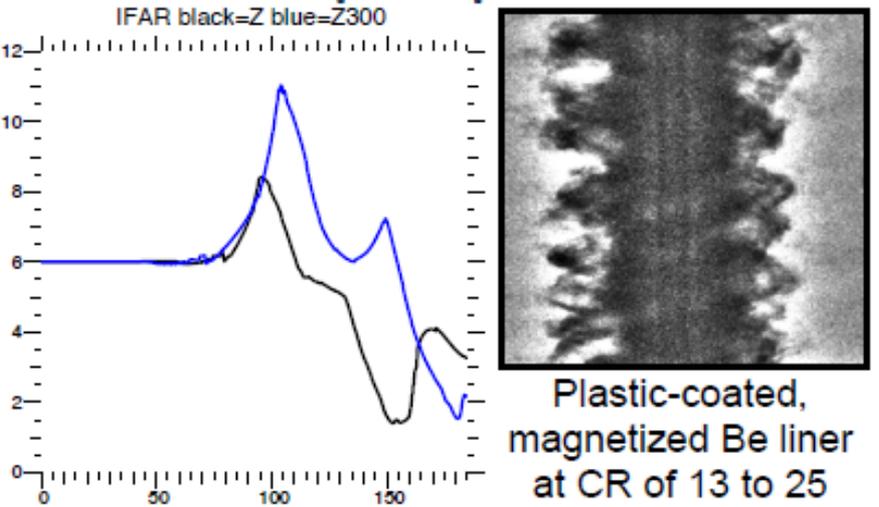
Искра 5,6

экспериментов: ДД или ДТ газ – 1; плазма – 2; заглушка – 3; линза – 4; лайнер –

Relative to the primary ICF approach, MagLIF uses a very different (conservative?) fuel compression method and largely unvalidated magneto-inertial fusion principles



Metric	X-ray Drive on NIF	100 kJ MagLIF on Z
Pressure	~140-160 Mbar	26 MA at 1 mm is 100 Mbar
Force vs. Radius	Goes as R ²	Goes as 1/R
Peak velocity	350-380 km/s	70-100 km/s
Peak IFAR	13-15 (high foot) to 17-20	8.5
Hot spot CR	35 (high foot) to 45	25
Volume Change	43000x (high) to 91000x	625x
Fuel rho-R	>0.3 g/cm ²	~0.003 g/cm ²
Liner rho-R	n/a	>0.3 g/cm ²
BR	n/a	>0.5 MG-cm
Burn time	0.15 to 0.2 ns	1 to 2 ns
T _{ion}	>4 keV	>4 keV



- Magnetic drive is fundamentally different than x-ray or laser-driven ablation
- By traditional ICF implosion metrics MagLIF is very conservative, though different physics
- Reaching fusion conditions relies on largely unvalidated MIF principles
 - Long stagnation time (2 ns) → more susceptible to high-Z contamination
 - Magnetic suppression of heat transport

Схемы воздействия на замагниченную мишень в магнитно-инерциальном термоядерном синтезе (МИТС)

Магнитно-инерциальный синтез с лазерными пучками

Создается затравочное начальное МП (державка + 2 отдельных витка по каждому из которых идет ток), сжатие мишени лазерными пучками в магнитном поле сферической антипробочной конфигурации.

Мишень – стандартная для ИТС

$\rho \sim 1 \text{ г/см}^3$ (10^{30} м^{-3}), $r_0 \sim 0.05 \text{ см}$, $\Delta r_0 \sim 20 \text{ мкм}$, $m = 70 \text{ мкг}$, $B_0 \sim 10 \text{ Тл}$, $\tau_E \sim 100 \text{ нс}$,

Интенсивность лазера $\sim 10^{16} \text{ Вт/см}^2$

$\rho \sim 30 \text{ г/см}^3$, $T \sim 7 \text{ кэВ}$, $B \sim 1000 \text{ Тл}$

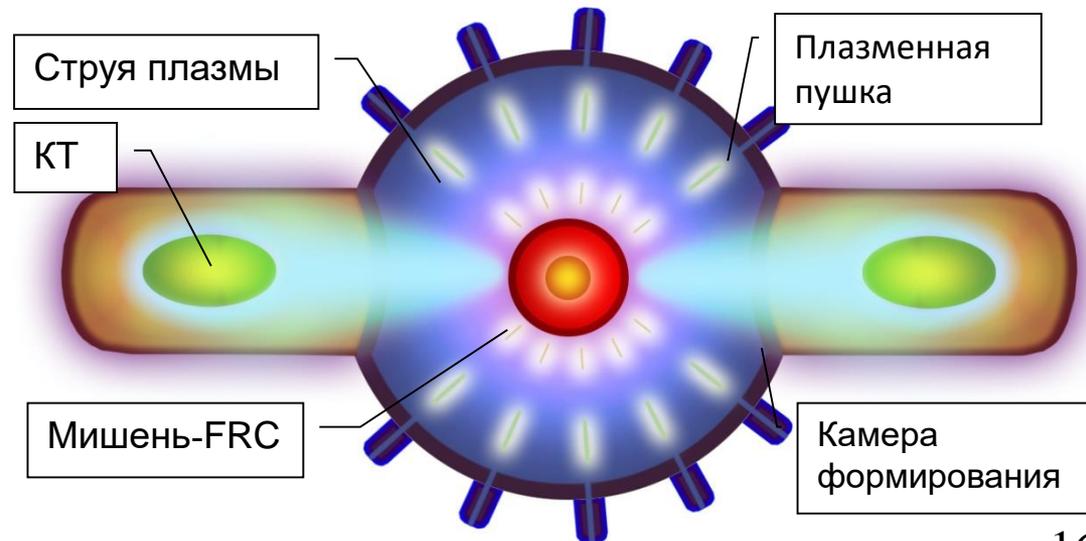
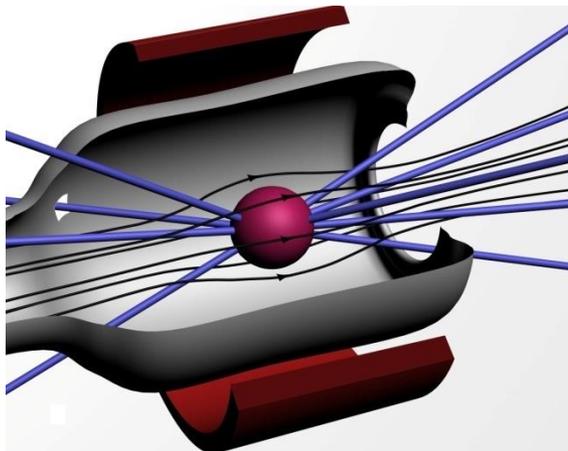
Магнитно-инерциальный синтез с плазменными струями

Формируется плазменная мишень, замагниченный плазмоид равномерно обжимается плазменными струями (плазменный лайнер).

Мишень нач. – $n \sim 10^{23} \text{ м}^{-3}$, $r_0 \sim 0.1 \text{ м}$, $T \sim 10 \text{ эВ}$, $B_0 \sim 1 \text{ Тл}$, $m = 0.007 \text{ г}$

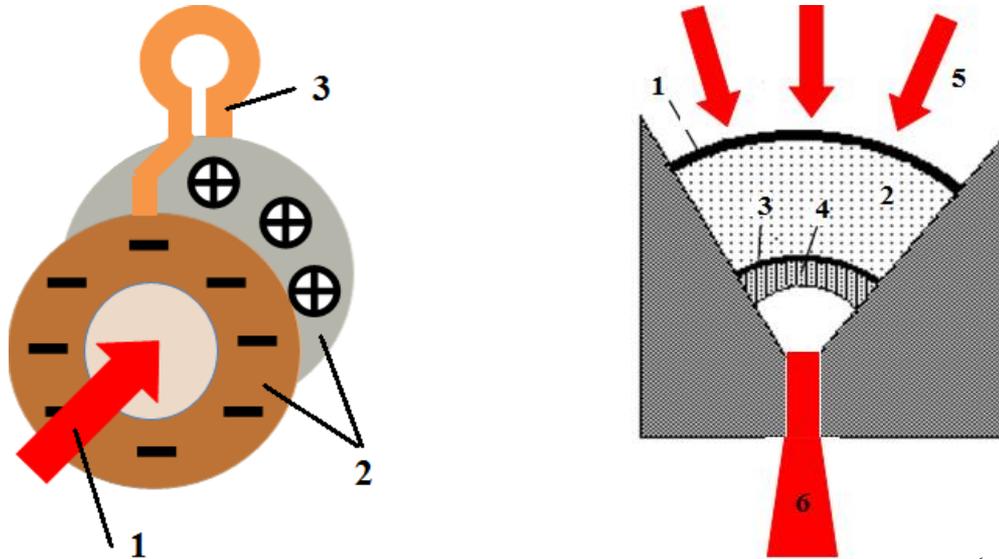
Сжатие – $t \sim 10 \text{ мкс}$, $\rho \sim 0.01\text{-}0.1 \text{ кг/м}^3$

Скорость струй $\sim 100 \text{ км/с}$, $r_0 \sim 0.005 \text{ м}$, $B \sim 300 \text{ Тл}$



Конструктивная схема сжатия и нагрева мишени нейтронного источника

Комбинированное воздействие на мишень интенсивного *лазерного излучения* и внешней (по отношению к мишени), ограничивающей расширение плазмы мишени, *системы импульсных струй*.



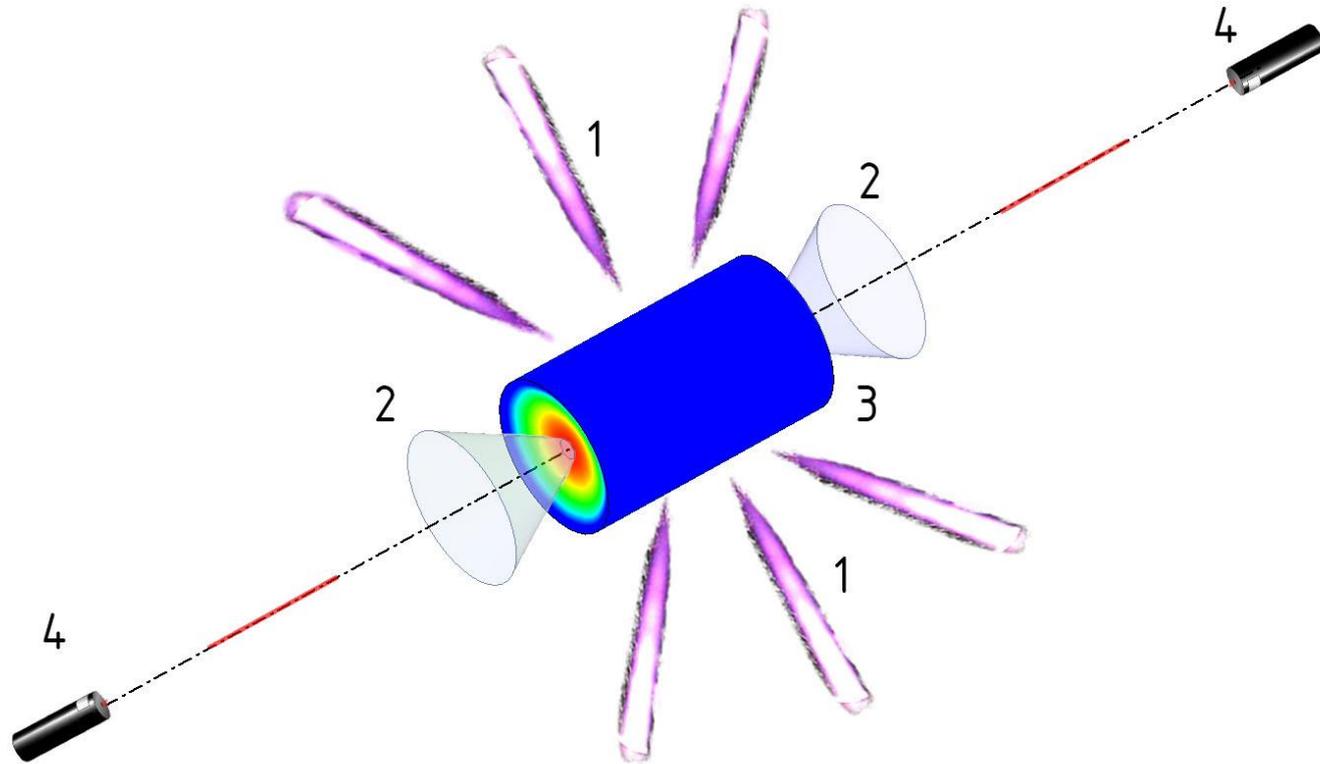
Схемы формирования систем импульсного внешнего магнитного поля (а) и плазменных струй (б):

а) 1 – лазерные лучи; 2 – дисковые электроды; 3 – токопровод;

б) 1 – внешняя оболочка; 2 – DT - газ малой плотности; 3 – внутренняя оболочка выполненная из золота; 4 – DT - лед; 5 – лазерные лучи; 6 – струя плазмы.

Показана возможность создания генераторов нейтронов на основе комбинированной схемы воздействия (число нейтронов на единицу длины 10^{15} н/см к моменту времени окончания воздействия).

Комбинированное воздействие на мишень в МИТС



1 – это плазменные или лазерные струи (интенсивные источники излучения), поступающие вдоль образующей цилиндрической поверхности мишени, отключаются через 10 нс ($q_{las0} = 10^{14}$ Вт/см²)

2 – конус, 3 – мишень,

4 – $q_{las1} = 10^{15}$ Вт/см² - это плотность потока лазерного излучения, вводимого через торцевую часть мишени МИТС (включается с 10 нс)



Постановка задачи

Модель течения замагниченной плазмы.

При воздействии мощной плазменной струи на плазму мишени, т.е. непосредственно в момент контакта, необходимо учитывать следующие явления: конвективный перенос, излучение, омический нагрев, теплопроводность и обмен энергией с продуктами реакции.

Уравнения динамики

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{d\xi}{dt} \frac{\partial \rho u}{\partial \xi} + \frac{d\eta}{dt} \frac{\partial \rho u}{\partial \eta} + \frac{1}{J} \frac{\partial (J \rho u V_\xi)}{\partial \xi} + \frac{1}{J} \frac{\partial (J \rho u V_\eta)}{\partial \eta} = -\xi_r \frac{\partial P}{\partial \xi} - \eta_r \frac{\partial P}{\partial \eta} - \alpha \frac{\rho u^2}{r} + \frac{S_r}{\text{Re}} + \frac{L_*}{c} [\vec{j} \times \vec{B}]_r \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{d\xi}{dt} \frac{\partial \rho v}{\partial \xi} + \frac{d\eta}{dt} \frac{\partial \rho v}{\partial \eta} + \frac{1}{J} \frac{\partial (J \rho v V_\xi)}{\partial \xi} + \frac{1}{J} \frac{\partial (J \rho v V_\eta)}{\partial \eta} = -\xi_z \frac{\partial P}{\partial \xi} - \eta_z \frac{\partial P}{\partial \eta} - \alpha \frac{\rho v^2}{r} + \frac{S_z}{\text{Re}} + \frac{L_*}{c} [\vec{j} \times \vec{B}]_z$$

Уравнение неразрывности $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{d\xi}{dt} \frac{\partial \rho}{\partial \xi} + \frac{d\eta}{dt} \frac{\partial \rho}{\partial \eta} + \frac{1}{J} \frac{\partial (J \rho V_\xi)}{\partial \xi} + \frac{1}{J} \frac{\partial (J \rho V_\eta)}{\partial \eta} = -\alpha \frac{\rho u}{r}$ $\alpha = 0$ - плоское, осесимметричное течение $\alpha = 1$

Уравнения энергии

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \frac{d\xi}{dt} \frac{\partial \rho e}{\partial \xi} + \frac{d\eta}{dt} \frac{\partial \rho e}{\partial \eta} + \frac{1}{J} \frac{\partial (J \rho e V_\xi + J \sum q_{i\xi})}{\partial \xi} + \frac{1}{J} \frac{\partial (J \rho e V_\eta + J \sum q_{i\eta})}{\partial \eta} = -\frac{P}{J} \left\{ \frac{\partial (J V_\xi)}{\partial \xi} + \frac{\partial (J V_\eta)}{\partial \eta} \right\} - \alpha \frac{P u}{r} - \alpha \frac{\rho e u}{r} + \frac{S_e}{\text{Re}} + \frac{L_*}{V_*} (\vec{j} \vec{E})$$

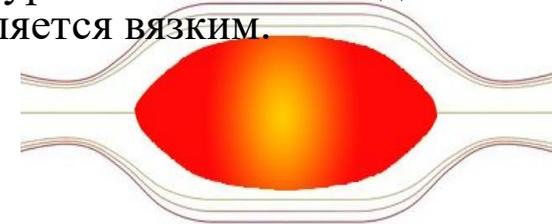
$$\frac{\partial \rho e_i}{\partial t} + \frac{d\xi}{dt} \frac{\partial \rho e_i}{\partial \xi} + \frac{d\eta}{dt} \frac{\partial \rho e_i}{\partial \eta} + \frac{1}{J} \frac{\partial (J \rho e_i V_\xi)}{\partial \xi} + \frac{1}{J} \frac{\partial (J \rho e_i V_\eta)}{\partial \eta} = -\frac{P_i}{J} \left\{ \frac{\partial (J V_\xi)}{\partial \xi} + \frac{\partial (J V_\eta)}{\partial \eta} \right\} - \alpha \frac{P_i u}{r} - \alpha \frac{\rho e_i u}{r} + \frac{(S_{e,Fus}^i + S_{e,Qei}^i)}{\text{Re}} + \frac{\gamma}{\text{RePr}} \text{div} \left(\sum_i [\lambda_{i,\Sigma}^{\perp\perp} \text{grad} T_i] \right)$$

S_r и S_z – силы, возникающие в потоке за счет наличия в нем сил вязкого трения, S_e – объемное энергосвечение, появляющееся из-за работы сил трения $\mathcal{D}(\mu_\Sigma^\perp + \mu_\Sigma^\parallel)/2$ (\mathcal{D} – диссипативная функция), переноса тепла процессами теплопроводности $\text{div} \left[\sum_k [\lambda_{k,\Sigma}^{\perp\perp} \text{grad} T_k] \right]$ и энергосвечения Q_L , обусловленного действием лазерного излучения на плазму окружающей среды и паров материала драйвера.

Постановка задачи.

Уравнение динамики магнитного поля

Рассматривается двумерная система магнитогидродинамических уравнений Рейнольдса в двухтемпературном приближении. Течение газа в мишени является вязким.



Уравнения электромагнитного поля

В подвижной адаптивной системе координат ξ, η, ζ с учетом конвекции и диффузии:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + (\vec{V}_{\xi, \eta, \zeta} \cdot \nabla \vec{B}) = \text{rot} [\vec{V} \times \vec{B}] - \frac{c^2}{4\pi} \frac{t_*}{L_*^2} \text{rot} \left(\frac{\text{rot} \vec{B}}{\sigma} \right) \quad \vec{j} = \sigma \left(\vec{E} + \frac{V_*}{c} [\vec{V} \times \vec{B}] \right) \quad (2)$$

$$(\vec{V}_{\xi, \eta, \zeta} \cdot \nabla \vec{B}) = \frac{d\xi}{dt} \frac{\partial \vec{B}}{\partial \xi} + \frac{d\eta}{dt} \frac{\partial \vec{B}}{\partial \eta} + \frac{d\zeta}{dt} \frac{\partial \vec{B}}{\partial \zeta} \quad \vec{V}_{\xi, \eta, \zeta} = \left(\frac{d\xi}{dt}, \frac{d\eta}{dt}, \frac{d\zeta}{dt} \right)^T$$

Уравнение динамики магнитного поля в упрощенной форме с учетом движения сеточного пространства:

$$\frac{\partial B_r}{\partial t} + \frac{d\xi}{dt} \frac{\partial B_r}{\partial \xi} + \frac{d\eta}{dt} \frac{\partial B_r}{\partial \eta} = \frac{\partial (uB_z)}{\partial z} - \frac{\partial (vB_r)}{\partial z} + \frac{c^2}{4\pi} \frac{t_*}{L_*^2} \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\sigma_{\square}} \frac{\partial B_r}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\sigma_{\square}} \frac{\partial B_z}{\partial r} \right) \right\}$$

$$\frac{\partial B_z}{\partial t} + \frac{d\xi}{dt} \frac{\partial B_z}{\partial \xi} + \frac{d\eta}{dt} \frac{\partial B_z}{\partial \eta} = -\frac{\partial r (uB_z)}{r \partial r} + \frac{\partial r (vB_r)}{r \partial r} + \frac{c^2}{4\pi} \frac{t_*}{L_*^2} \left\{ \frac{\partial}{r \partial r} \left(\frac{r}{\sigma_{\square}} \frac{\partial B_z}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{r \partial r} \left(\frac{r}{\sigma_{\square}} \frac{\partial B_r}{\partial z} \right) \right\} \quad (3)$$

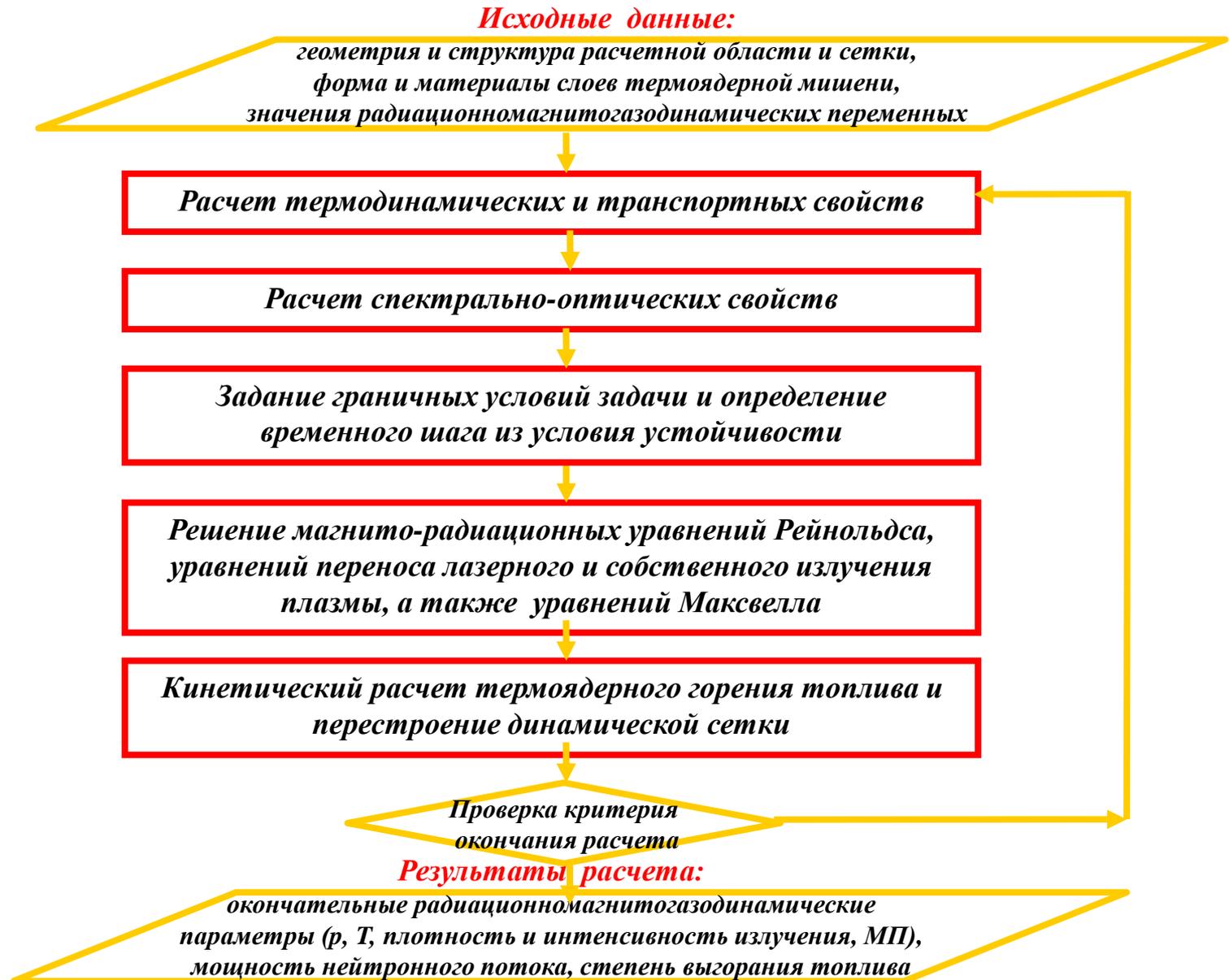
Математическая модель импульсных радиационно-магнитогазодинамических (РМГД) систем



<p>Уравнения многокомпонентной однотемпературной радиационной плазмодинамики</p> $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{V}^r) = 0, \quad \frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho_i \mathbf{V}^r) = 0, \quad \rho = \sum_i \rho_i,$ $\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{V}^r) + \operatorname{div}(\rho u_k) = -\operatorname{grad} p + \frac{1}{c} [\mathbf{j}^r \mathbf{H}^r],$ $\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(\mathbf{e} + \frac{\mathbf{V}^r{}^2}{2} \right) \right] + \operatorname{div} \left\{ \rho \mathbf{V}^r \left(\mathbf{e} + \frac{p}{\rho} + \frac{\mathbf{V}^r{}^2}{2} \right) + \mathbf{q}^r \right\} = \mathbf{j}^r \mathbf{E}^r$	<p>Система уравнений Максвелла и закона Ома</p> $\operatorname{rot} \mathbf{H}^r = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}^r, \quad \operatorname{rot} \mathbf{E}^r = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{H}^r}{\partial t},$ $\mathbf{j}^r = \sigma \left(\mathbf{E}^r + \frac{1}{c} [\mathbf{V}^r \mathbf{H}^r] \right) - \beta [\mathbf{j}^r \mathbf{H}^r]$ <p>Уравнение переноса излучения в многогрупповом диффузионном приближении</p> $\operatorname{div} \mathbf{q}_i^r + \chi_i c U_i = \chi_i c T^4 \int_{\nu_i} U_{\nu} (T, \nu) d\nu,$ $\frac{c}{3} \operatorname{grad} U_{\nu_i} + \chi_i \mathbf{q}_i^r = 0, \quad \mathbf{q}^r = \sum_i \mathbf{q}_i^r$
<p>Расчет парциального состава и термодинамических параметров многокомпонентной плазмы</p> $\frac{n_{Z+1,A} n_e}{n_{Z,A}} = 2 \frac{\sum_{Z+1,A}}{\sum_{Z,A}} \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp \left[-\frac{1}{kT} \left(I_{Z,A} - \frac{Z e^2}{r_b} \right) \right],$ $\sum_{Z=0}^A n_{Z,A} = C_A n_0, \quad \sum_{Z,A} n_{Z,A} (Z-1) = n_e, \quad x_{Z,A} = \frac{n_{Z,A}}{n_0},$ $n = \sum_Z n_{Z,A}, \quad \alpha_e = \frac{n_e}{n}, \quad \varepsilon = \frac{1}{m_0 \sum_A A C_A} \left[\frac{3}{2} kT (1 + \alpha_e) + \sum_A \sum_{Z=1}^A \alpha_{Z-1,A} \left(I_{Z-1,A} - \frac{(Z-1)e^2}{r_b} \right) \right],$ $p = \frac{\rho kT (1 + \alpha_e)}{m_0 \sum_A A C_A}, \quad \gamma = 1 + \frac{p}{\rho \varepsilon}$	<p>Расчет термодинамических и оптических характеристик многокомпонентной плазмы</p> <p>При низких $T < 100$ кК - компьютерная система ASTEROID (С.Т. Суржиков). При высоких - учет квантово-статистической модели Томаса-Ферми для определения термодинамических свойств газа и плазмы. Полные коэффициенты поглощения:</p> $\chi'_\nu = n \sum_{Z,A} x_{Z,A} \left(\sigma_{Z,A}^T + \sigma_{Z,A}^\Phi \right) \left[1 - \exp \left(-\frac{h\nu}{kT} \right) \right]$ <p>Сечение тормозного поглощения - по формуле Крамерса с множителем Гаунта. Сечения фотоионизации основных и первых возбужденных состояний - с применением результатов квантомеханических расчетов. Сечения фотоионизации более высоких возбужденных состояний (с учетом ~100 возбужденных состояний на каждый ион) - по методу квантового дефекта. Вклад высоковозбужденных состояний - метод Л.М. Бибермана и Г.Э. Нормана.</p>
<p>Система уравнений (СУ) светозероизонного испарения элементов конструкции электродного узла</p> $\frac{\partial T_s}{\partial t} = a_m \frac{\partial T_s}{\partial z^2} + V_0 \frac{\partial T_s}{\partial z}$ <p>с граничными и начальными условиями</p> $k_m \frac{\partial T_s}{\partial z}(0, y, t) = q_z(0, y, t) - L_{\rho}(0, y, t) v(0, y, t),$ $T_s(z \rightarrow \infty, y, t) = T_0, \quad T_s(0, y, t=0) = T_0,$ <p>дополнена СУ - кинетика испарения конденсированного вещества в рамках модели с кнудсеновским слоем.</p>	<p>Электротехнические уравнения разрядного контура</p> $\frac{1}{c^2} \frac{dL_C J}{dt} + R_C J = U_k, \quad \frac{dU_k}{dt} = -\frac{J}{C},$ $R_C = R_0 + R_{nn} - \frac{1}{2c^2} \frac{dL_{nn}}{dt}, \quad L_C = L_0 + L_{nn},$ $L_{nn} = \frac{c^2}{4\pi J^2} \int_V H^2 dV, \quad R_{nn} = \frac{1}{J^2} \int_V \frac{j^2}{\sigma} dV$

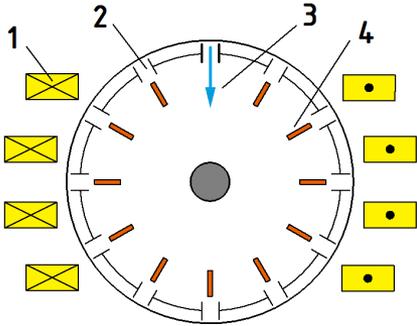
Разработаны математические модели взаимодействия лазера высокой энергии импульса и импульсной плазменной струи с замагниченной мишенью, основанные на уравнениях радиационной плазмодинамики, записанных в произвольных криволинейных координатах.

Алгоритм расчета основных параметров взаимодействия замагниченной мишени с мощным источником излучения

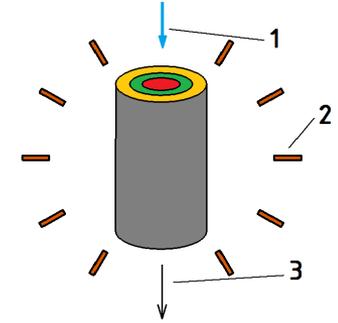




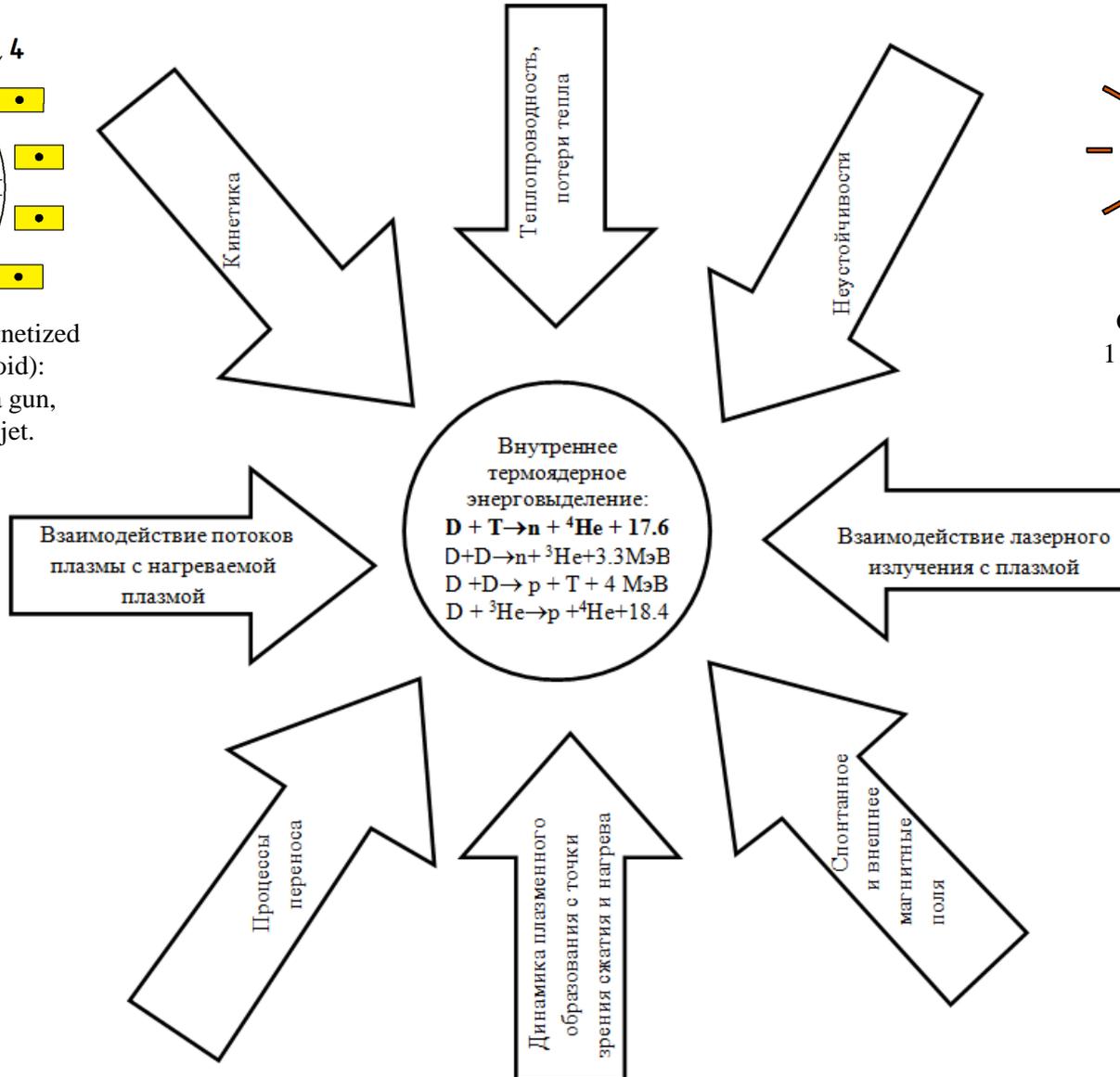
The interaction processes between magnetized targets and powerful radiation sources



Compression of preheated magnetized target plasma (compact toroid):
 1 – magnetic coil, 2 – plasma gun,
 3 – laser beam, 4 – plasma jet.

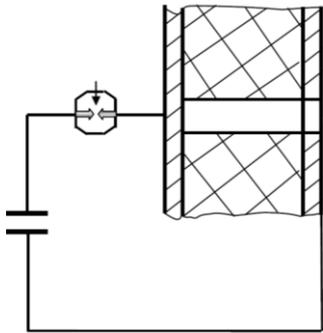


Cryogenic IFE target:
 1 – laser, 2 – plasma jet,
 3 – magnetic field

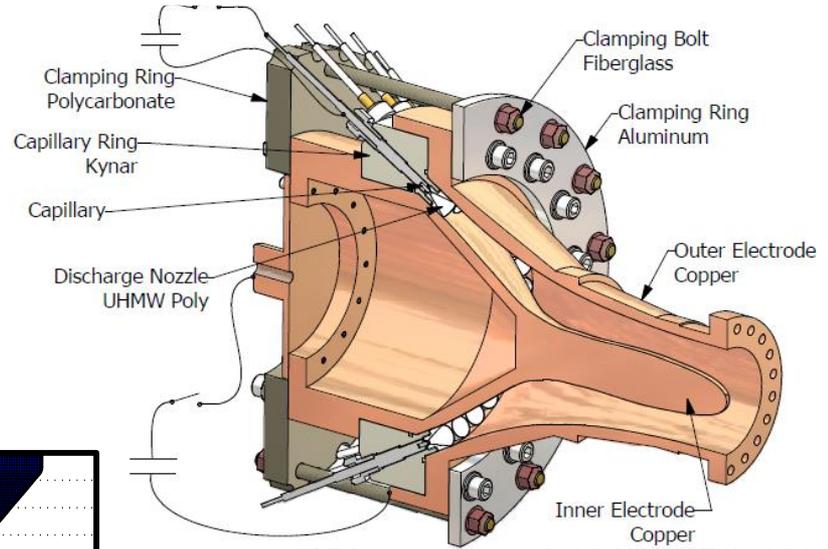


Computer simulation of the effect of external magnetic field on the plasma jet system

The initial data of the air environment and characteristics of the capillary discharge:



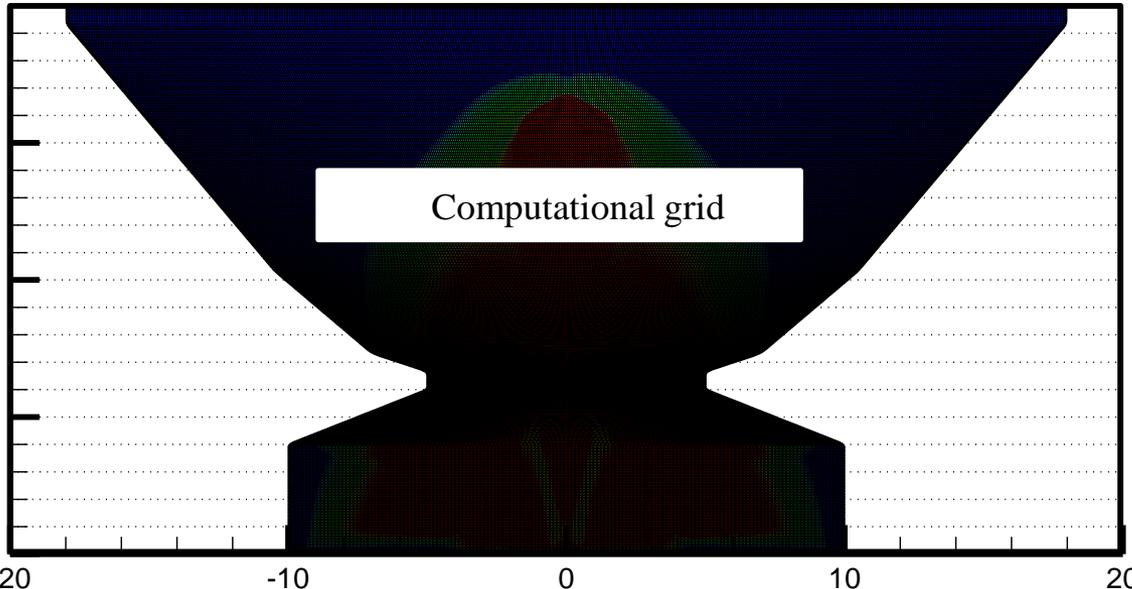
The unperturbed gas environment (Air)
 $P = 1 \text{ atm}$, $T = 300 \text{ K}$
 Capacitive storage $W = 2,7 \text{ kJ}$ $t_{xap} = 25 \text{ MKC}$
 The characteristic time of energy input
 The diameter of the capillary $d = 10 \text{ mm}$
 The length of the capillary $L = 50 \text{ mm}$
 The variation of the output of an unplanned capillary time
 $n = [5, 140]$



Witherspoon et al, 36th ICOPS (2009)

Half-Scale Prototype
**MiniRailgun Accelerator for Plasma Liner
 Driven HEDP and Magneto-Inertial
 Fusion Experiments**

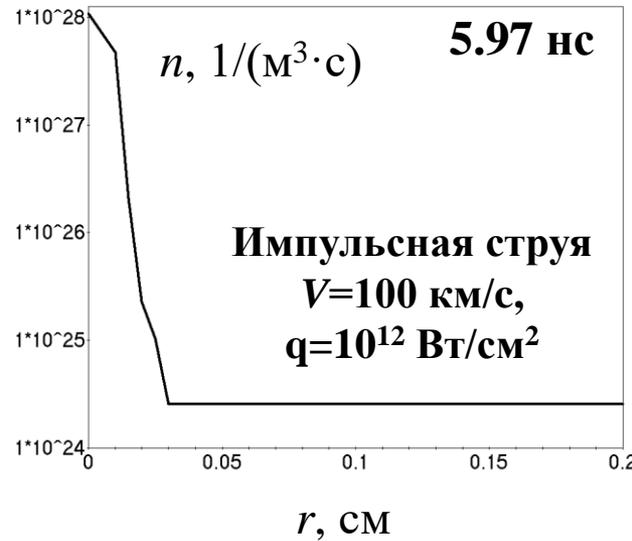
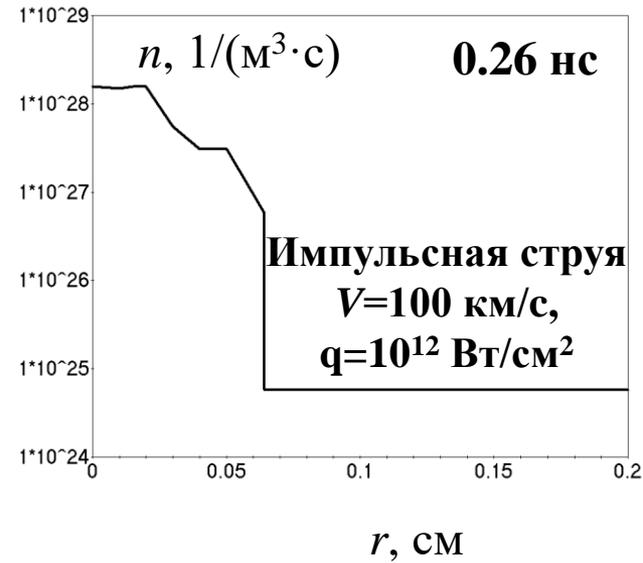
32 ablative capillaries (CH_2)
 $\sim 100 \text{ km/s}$, $\sim 300 \text{ kA}$, yielded $100 \text{ } \mu\text{g}$ plasma
 Plasma density 10^{18} cm^{-3} ,
 Density in the jet plume 10^{17} cm^{-3}



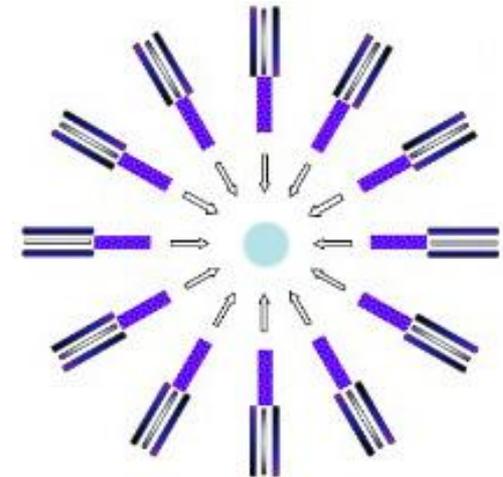
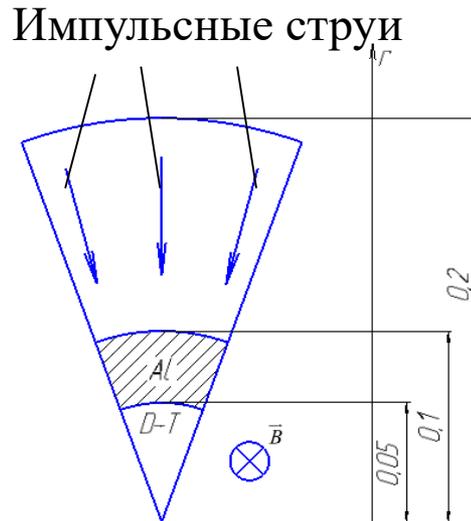
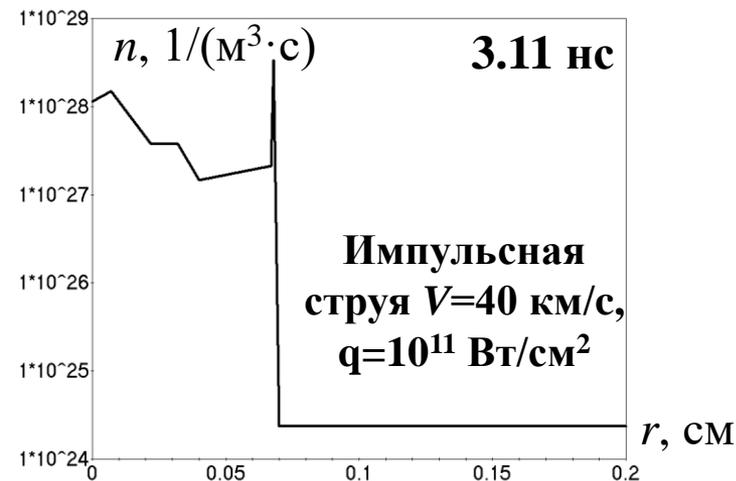
The capillary discharge R with an evaporating (due to radiation in the capillary channel) walls



Оценки объемного образования нейтронов в мишени под действием импульсной струи $V=40-100$ км/с, $q=10^{11-12}$ Вт/см²

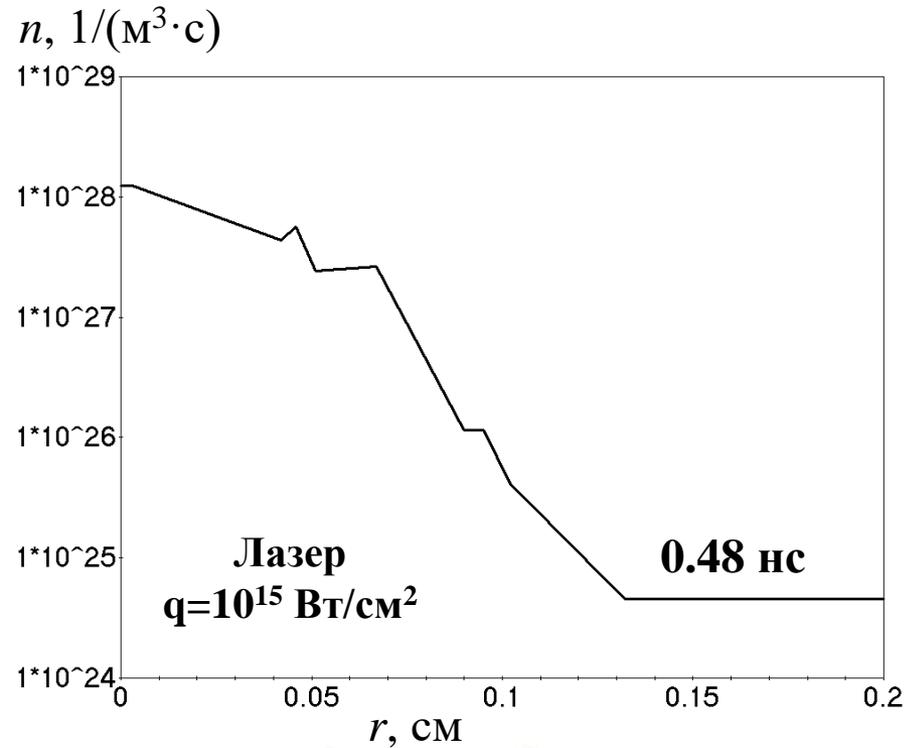
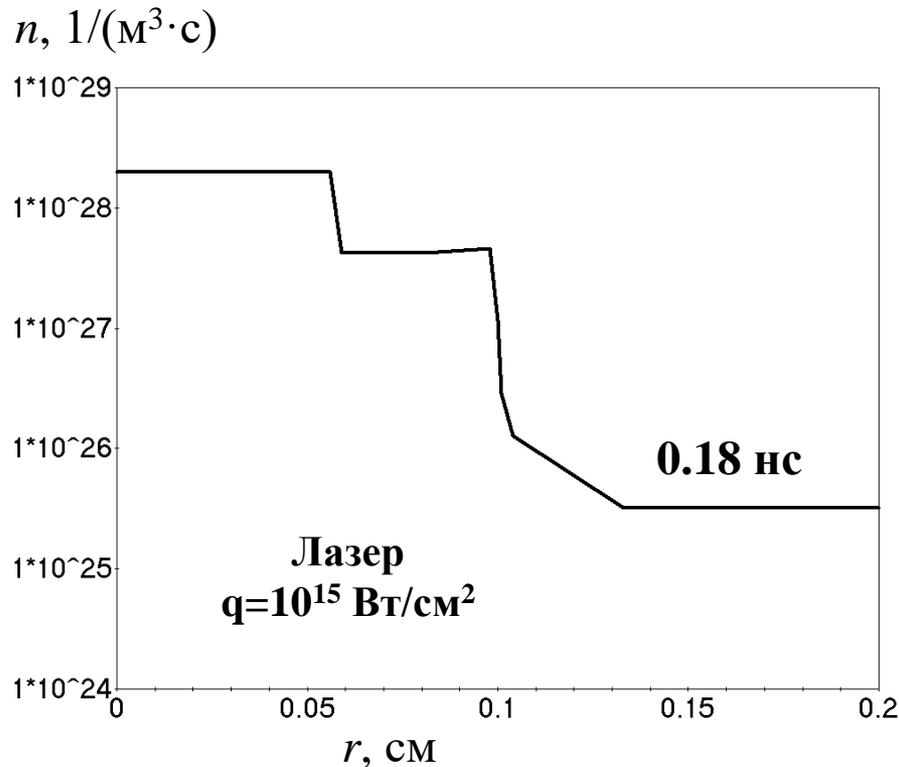


**Выход нейтронов в импульсе:
 10^9-10^{10} нейтрон/имп**

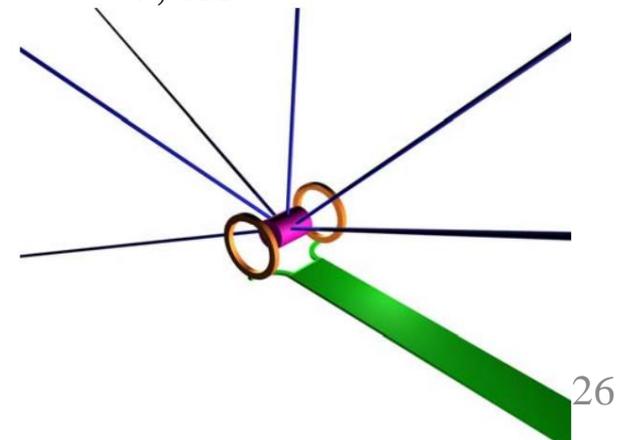




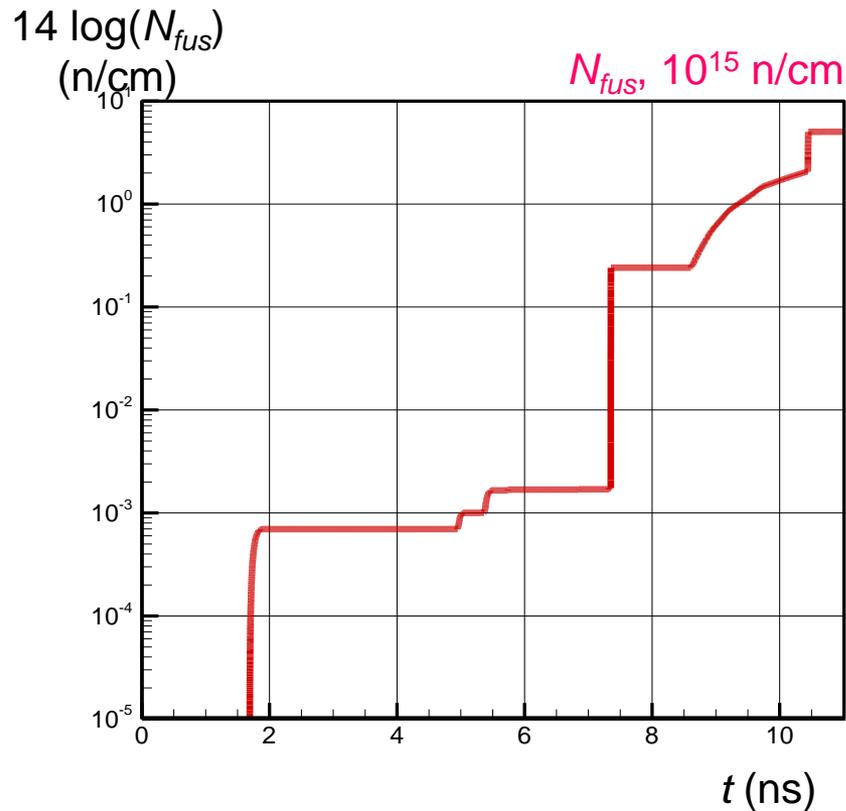
Оценки объемного образования нейтронов в мишени под действием лазера $q=10^{15}$ Вт/см²



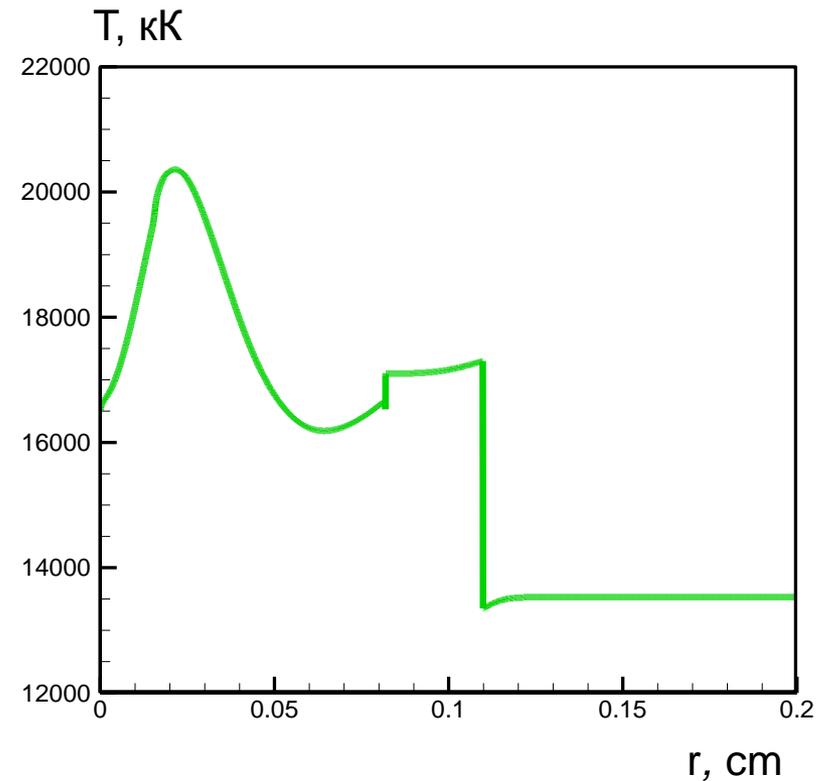
**Выход нейтронов в импульсе:
 10^{10} - 10^{11} нейтрон/имп**



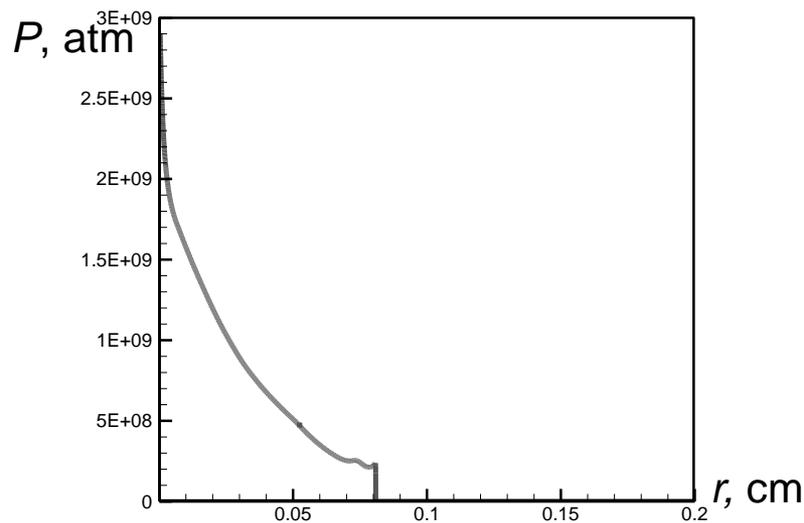
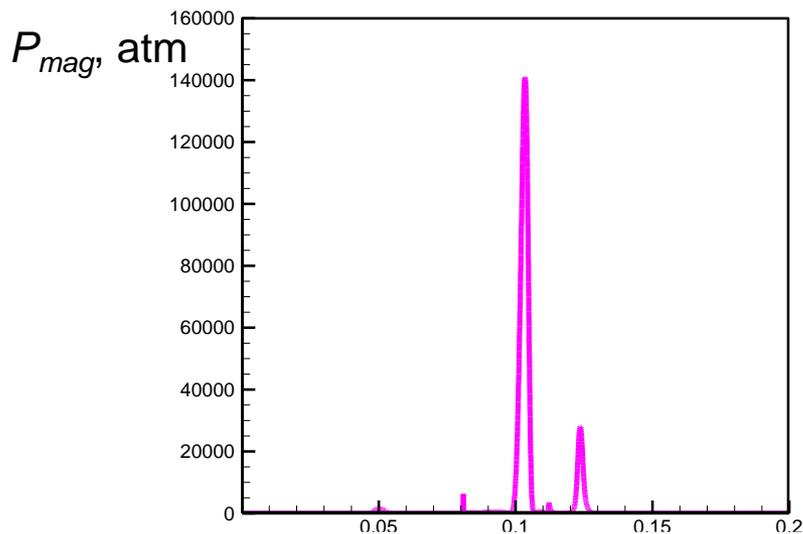
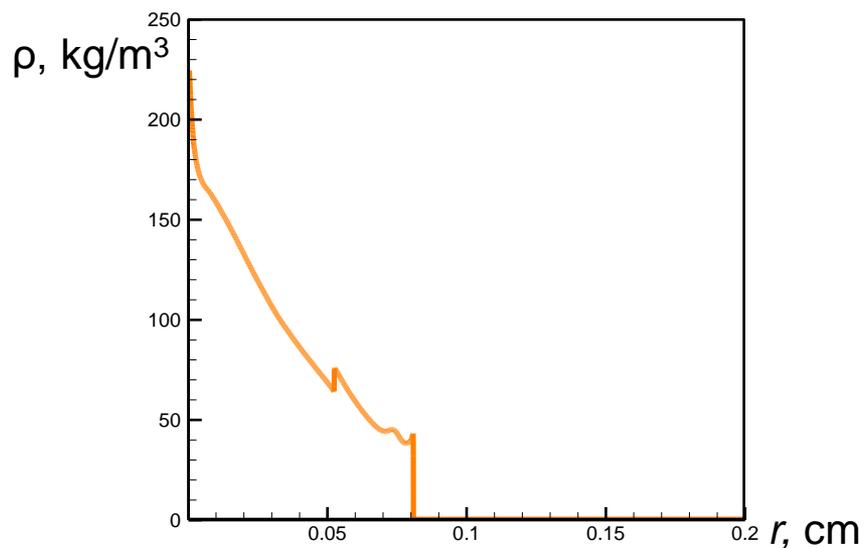
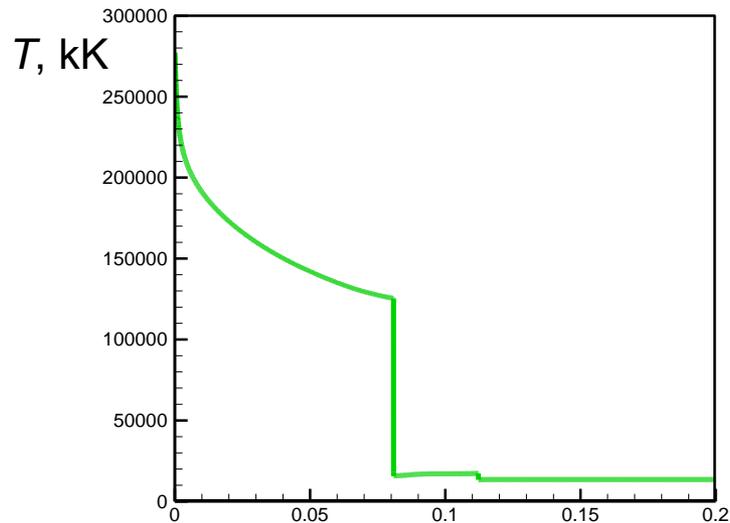
The number of neutrons leaving
the computational domain by the
time t



Temperature spatial distribution
for 10^{14} W/cm², $3,08 \times 10^{14}$ n/cm
 $t=9.99$ ns

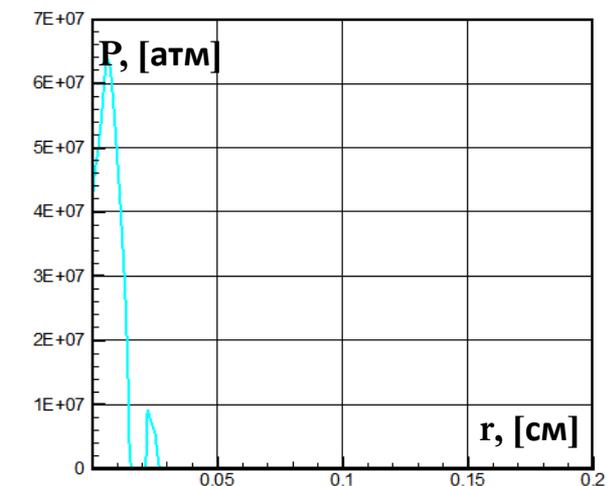


Spatial distribution of temperature T , density ρ , magnetic P_{mag} and static pressure for number of neutrons per unit length 10^{15} n/cm, time $t = 10.3$ ns



The temperature of the central part of the target can reach $T = 250$ million K

Лазерное воздействие на замагниченную мишень в магнитно-инерциальном синтезе

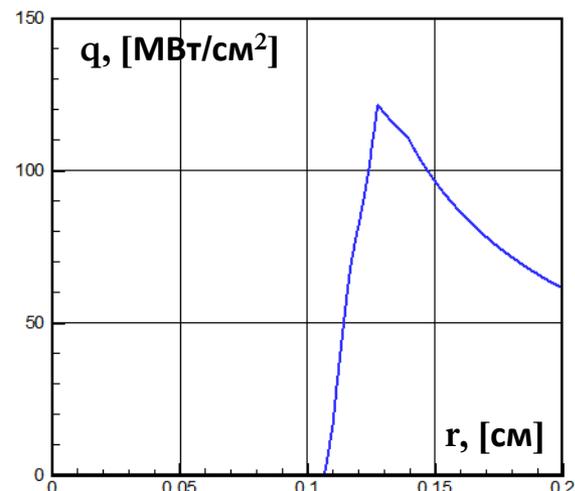
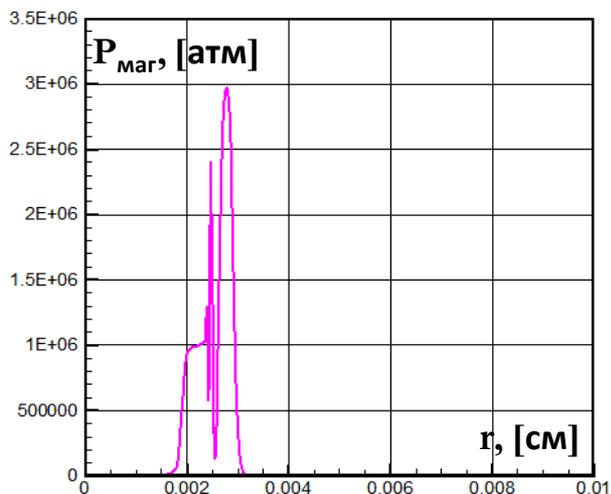
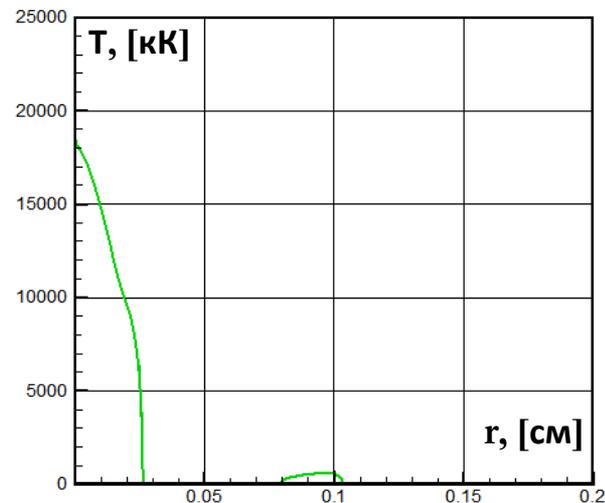


плотность потока
лазерного излучения

$$q_{Laz} = 2 \times 10^{14} \frac{Вт}{см^2}$$

время воздействия
лазера

$$t_{Laz} \in [0, 10] \text{ нс}$$

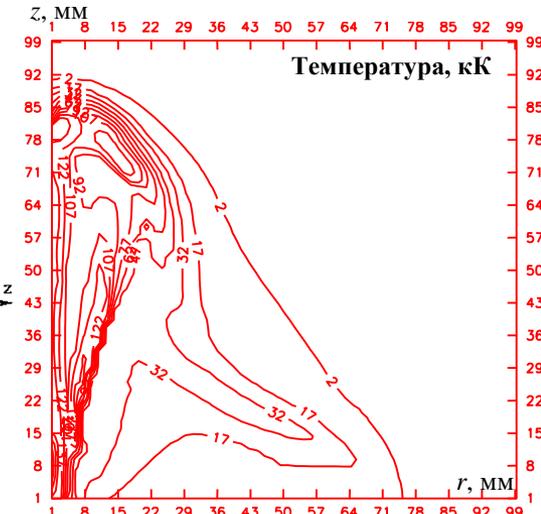
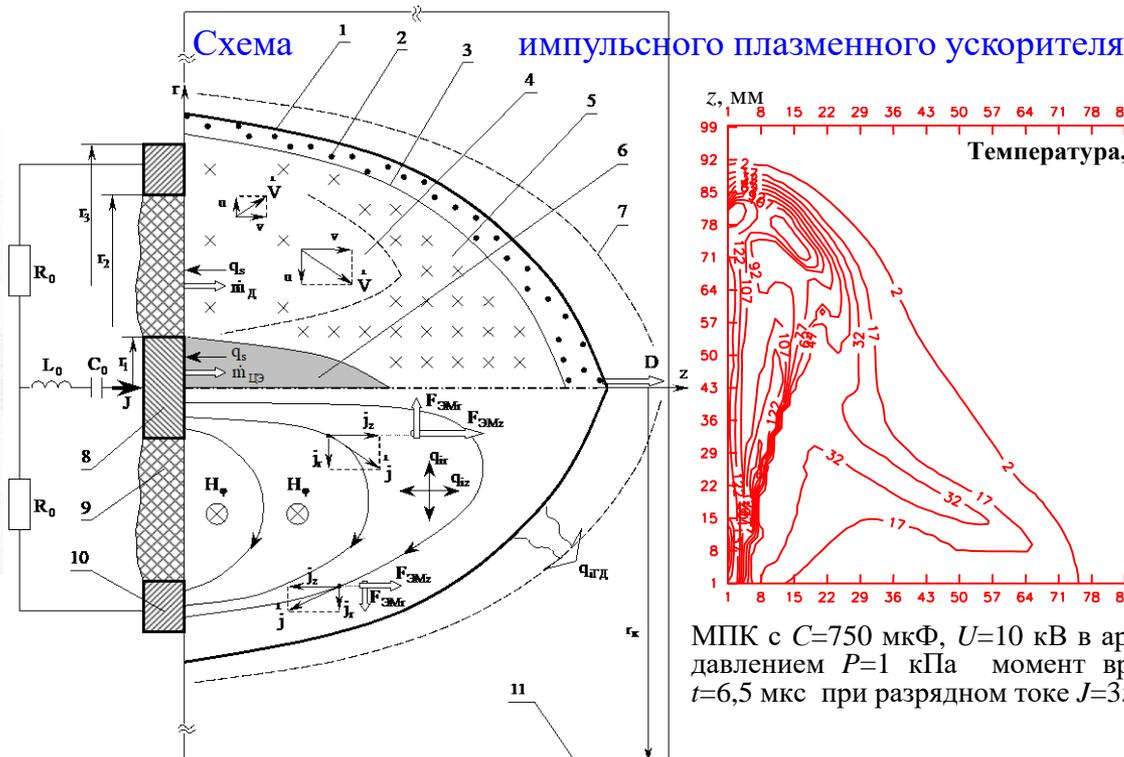


Пространственное распределение давления, магнитного давления P_{mag} , температуры и потока собственного широкополосного излучения на момент времени $t=8,5$ нс

Импульсные источники нейтронов на основе магнитоплазменного компрессора (МПК)



плазменный фокус
 $\sim 10^{10}-10^{12}$ нейтронов/имп



МПК с $C=750$ мкФ, $U=10$ кВ в аргоне с давлением $P=1$ кПа момент времени $t=6,5$ мкс при разрядном токе $J=353$ кА

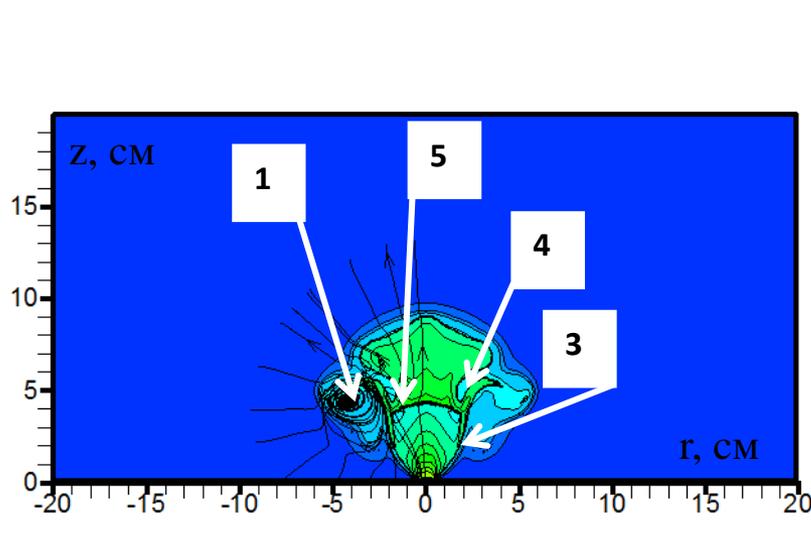
- 1 – ударная волна (УВ) в газе; 2 – ударно-сжатый газ; 3 – контактная граница;
- 4 – область ускоренной плазмы паров межэлектродной диэлектрической вставки (МДВ); 5 – область ударно-сжатой плазмы паров МДВ; 6 – плазма паров центрального электрода; 7 – граница области радиационного воздействия;
- 9 – МДВ; 8, 10 – центральный и наружный электроды; 11 – стенки камеры (или граница расчетной области Γ).

- **Наиболее перспективные области применения МПК разряда:**
 - Оптическая накачка мощных фотодиссоционных газовых лазеров коротковолнового (видимого и ультрафиолетового) диапазонов
 - Решение ряда **экологических задач**: фотолизная очистка природного и промышленных газов от вредных примесей
 - Использование МПК-разряда для повышения надежности работы двигателя (в системе экстренного поджига топливной смеси, т.к. обеспечивает быстрое (1-3 мкс) формирование плазменного высокотемпературного образования в глубине потока топливно-воздушной смеси).

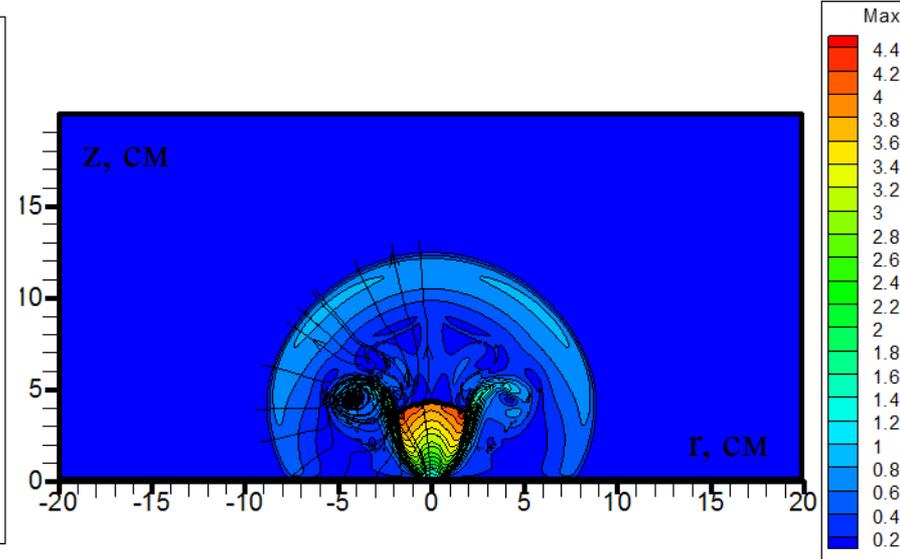
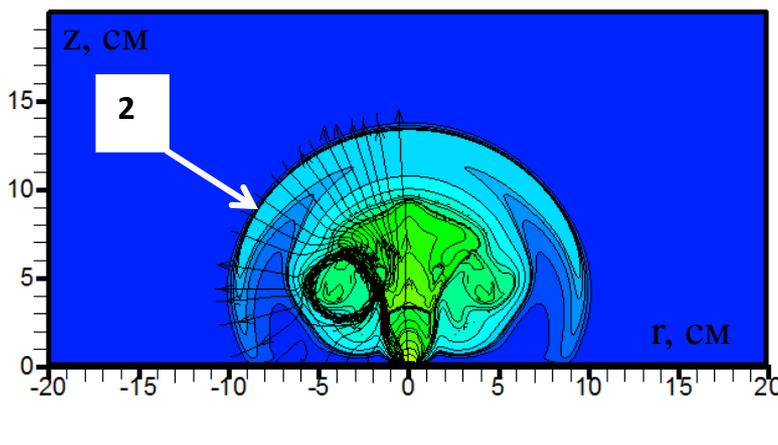
Плазодинамические процессы в капиллярных разрядах с испаряющейся стенкой (КРИС)



Пространственное распределение температуры T [K] и числа Маха в струе плазмы при $W=2,7$ кДж



1 - область разгонного вихря, 2 - косая (передняя) УВ
3 - "висячая" УВ, 4 - отраженная УВ,
5 - центральная УВ (диск Маха)



Сравнение расчетных и экспериментальных результатов:

Скорость движения границы разряда вдоль оси Z

$$V|_{2, \text{эксп}} = 4 \text{ км/с} - \text{эксперимент} \quad V|_{\text{расч}} = 4,4 \text{ км/с} - \text{расчет}$$

Положение диска Маха на оси Z

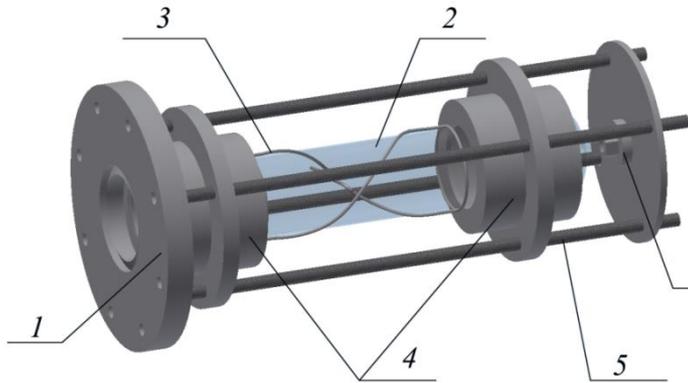
$$P_0/P_\infty = 2,4(X_M/D)^2$$

X_M - расстояние от среза сопла до диска Маха;
 D - диаметр капилляра

$$X_M = 2,88 \text{ см} - \text{эксперимент} \quad X_M = 3,1 \text{ см} - \text{расчет}$$

Структура плазмы геликонных источников и коаксиального магнитоплазменного ускорителя (КМПУ)

Геликонный источник ионов



- 1) Фланец для подсоединения к вакуумной установке;
- 2) **Стекланный баллон;**
- 3) **Антенна геликонного типа;**
- 4) **Магнитная система (постоянные магниты, либо соленоиды);**
- 5) Узел крепления магнитной системы;
- 6) Штуцерно-нипельное соединение (для подводки магистрали напуска рабочего газа).

Геликонный ускоритель плазмы

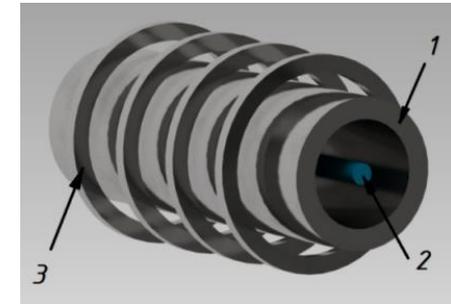
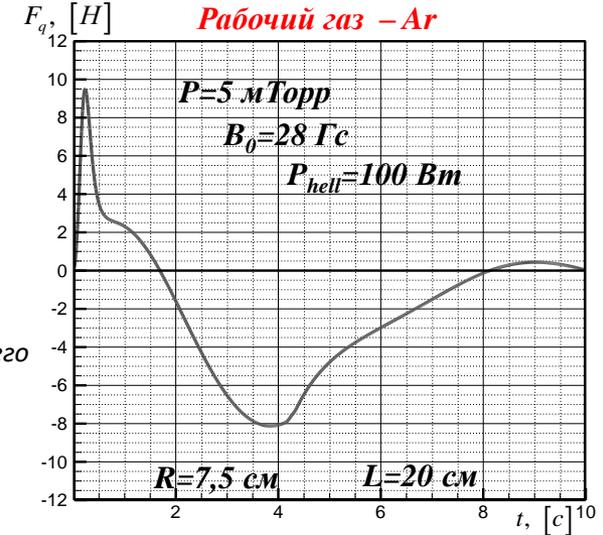
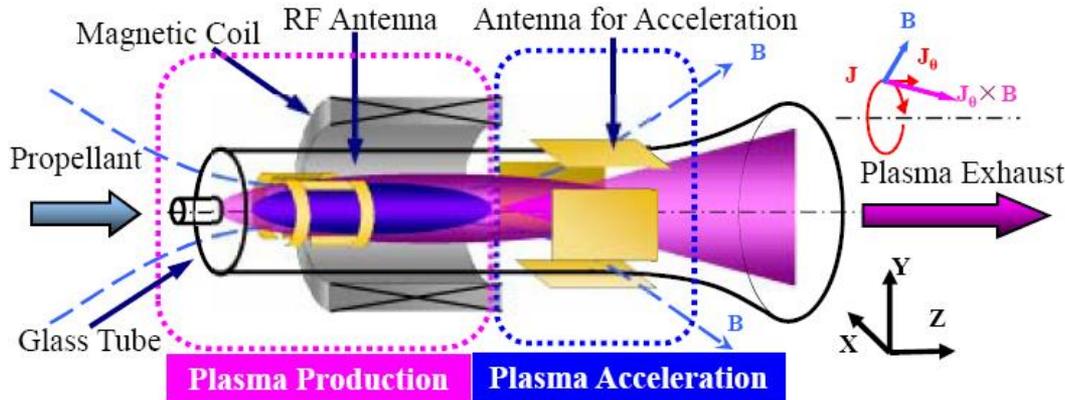


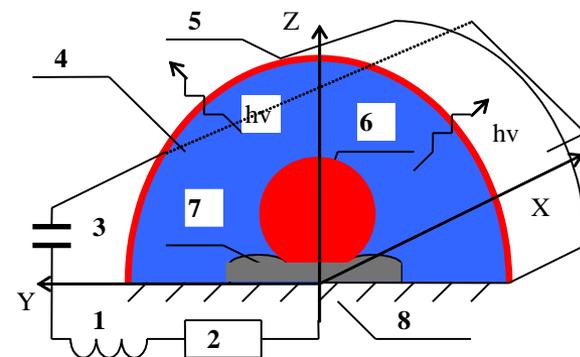
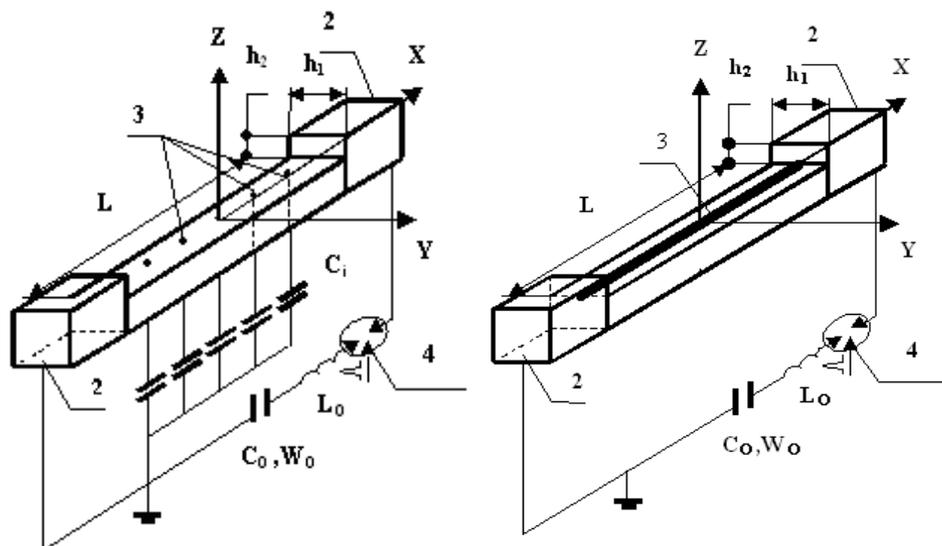
Схема **коаксиального магнитоплазменного ускорителя (КМПУ):**

1 – электрод, 2 – центральный электрод, 3 – индуктор

Наиболее перспективные области применения геликонного источника ионов:

- Экономичность, высокая надежность, простой способ регулировки и низкая себестоимость такого рода ВЧ-разрядов позволяет с высокой степенью эффективности проводить **плазмохимические реакции, обработку и модификацию поверхностных слоев** различных материалов, формирование тонких пленок, использовать их в области ускорительной техники и т.д.
- геликонных разрядов для создания высокоинтенсивных генераторов нейтронов и двигателей.

Моделирование воздействия линейно-стабилизированного поверхностного разряда (ЛСПР)



Конструктивная и электротехническая схема ЛСПР:

1 - индуктивность цепи L_0 ; 2 – электроды; 3 – межэлектродная вставка; 4 - разрядник

Диапазоны изменения основных параметров ЛСПР:

$P \approx (0.01 \div 5)$ атм - характерное давление окружающего газа;
 $C_0 = (1 \div 400)$ мкФ - емкость конденсаторной батареи;
 $J_M = (10 \div 500)$ кА - максимальный разрядный ток в ЛСПР;
 тока

$L = (10 \div 100)$ см - длина разрядного промежутка газа;
 $U_0 > 20$ кВ - начальное напряжение на конденсаторной батарее;
 $t_1 = (5 \div 40)$ мкс длительность первого полупериода разрядного

■ Наиболее перспективные области применения импульсного поверхностного разряда:

- Оптическая накачка мощных фотодиссоционных газовых лазеров коротковолнового (видимого и ультрафиолетового) диапазонов
- Решение ряда **экологических задач**: фотолизная очистка природного и промышленных газов от вредных примесей
- Генератор ударных волн (УВ) и широкополосного теплового излучения
- Использование импульса отдачи, передаваемый межэлектродной вставке плазмой линейно-стабилизированного поверхностного разряда, для изменения траектории полета летательных аппаратов

Численное моделирование воздействия импульсного поверхностного разряда на твердую преграду



Линии уровня плотности ρ [кг/м³] и температуры T [кК] в момент времени первого максимума разрядного тока J

Сравнение расчетных и экспериментальных результатов:

Скорость движения границы разряда при $C_0=3\text{мкФ}$, $U_0=25\text{кВ}$, $L=25\text{см}$

$D=1,8\text{ км/с}$ – расчет; $D=1,6\text{ км/с}$ – эксперимент

Скорость движения границы разряда при $C_0=3\text{мкФ}$, $U_0=25\text{кВ}$, $L=50\text{см}$

$D=1,45\text{ км/с}$ – расчет; $D=1,5\text{ км/с}$ – эксперимент

Эрозионный износ металлокерамической (Al_2O_3) поверхности МДВ при $W_0=0,6\text{ кДж}$,

$R_{\text{эл}}=10\text{ МВт/с}$ $M_{\text{п}} \approx (4 \pm 1) \cdot 10^{-6}\text{ кг/м}$ - расчет

$M_{\text{п}} \approx (2 \div 3) \cdot 10^{-6}\text{ кг/м}$ - эксперимент

Яркостная температура $T_{\text{я}}$ и максимальные значения относительного светового

выхода K , измеренные на различных длинах волн УФ-области спектра

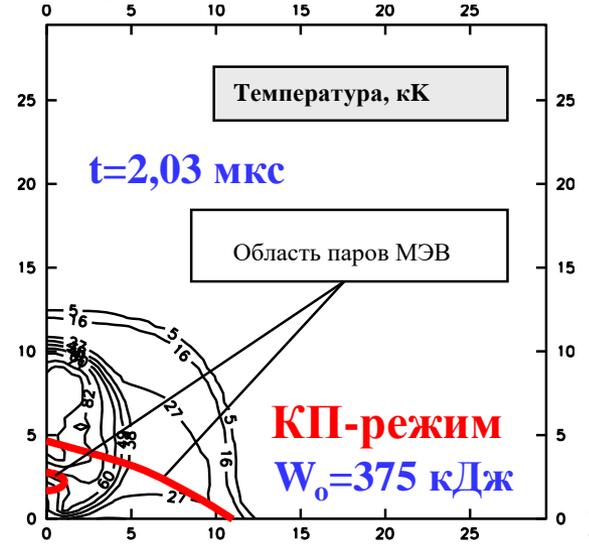
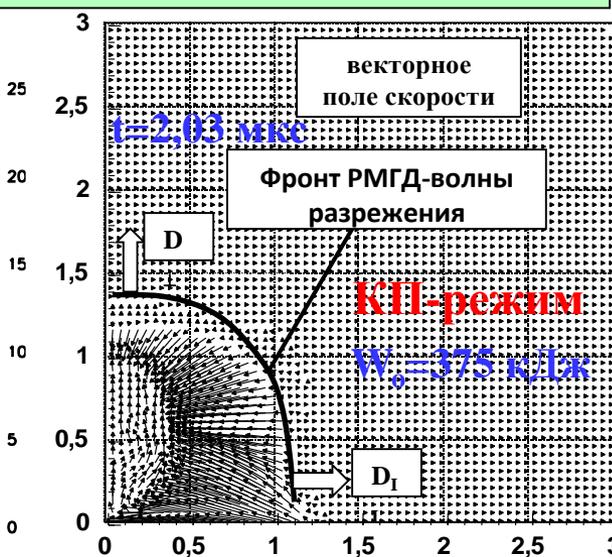
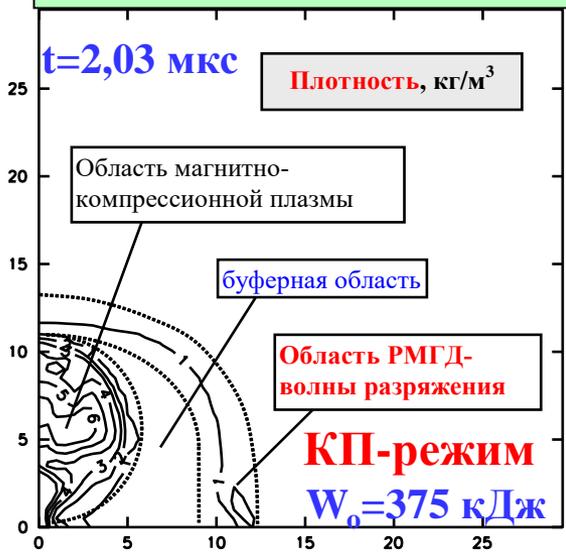
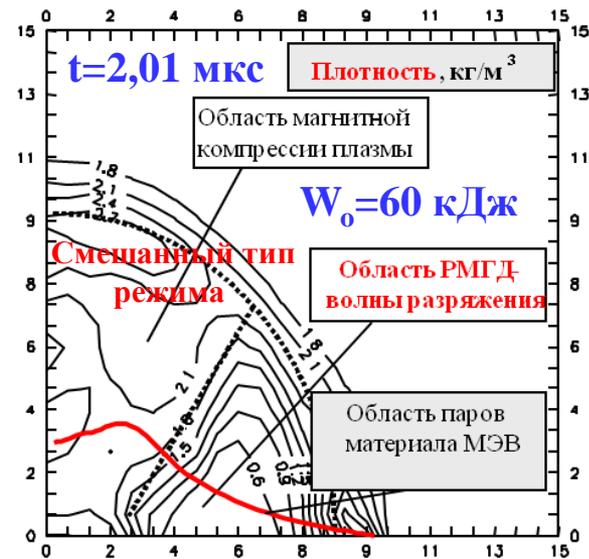
$T_{\text{я}}=25\text{ кК}$, $K=50\%$ для $U_0=25\text{ кВ}$, $L_{\text{РАЗ}}=50\text{ см}$ - эксперимент

$T_{\text{я}}=20\text{ кК}$, $K=45\%$ - расчет

$T_{\text{я}}=30\text{ кК}$, $K=49\%$ для $U_0=25\text{ кВ}$, $L_{\text{РАЗ}}=25\text{ см}$ - эксперимент

$T_{\text{я}}=25\text{ кК}$, $K=46\%$ - расчет

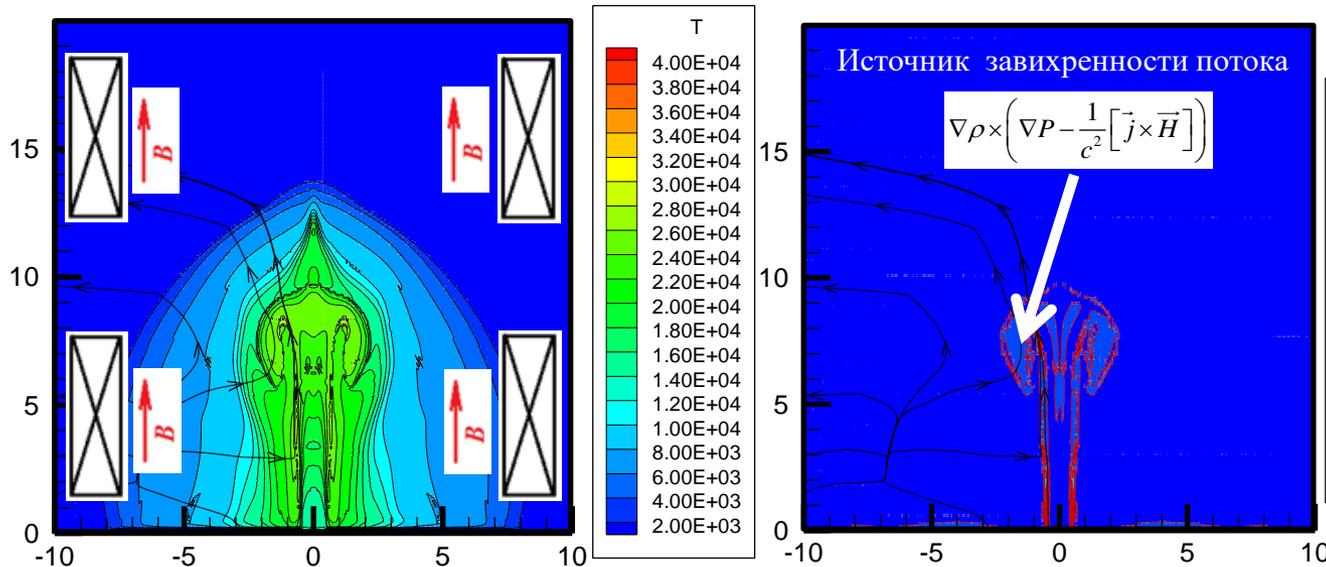
РМГД – радиационно-магнитная волна разрядения



Компьютерное моделирование плазодинамических процессов в системе капиллярных разрядов



Пространственное распределение функции завихренности и температуры T [К] в струе плазмы КРИС при наличии внешнего магнитного поля 2,5 Тл на момент времени 46,9 мкс



$$\frac{\partial \vec{\Omega}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{\Omega} = \frac{1}{\rho^2} \nabla \rho \times \left(\nabla P - \frac{1}{c^2} [\vec{j} \times \vec{H}] \right) + \nu \Delta \vec{\Omega}$$

Выражение для завихренности

$$\vec{\Omega} = \text{rot}(\vec{V})$$

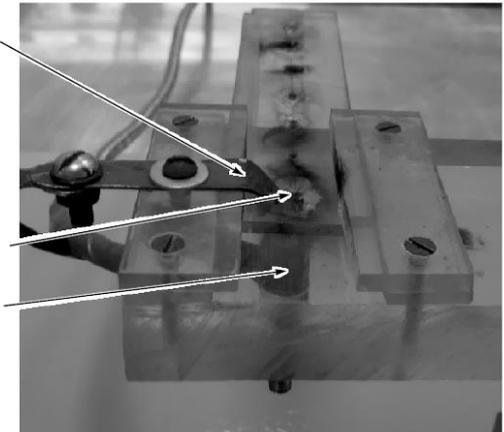
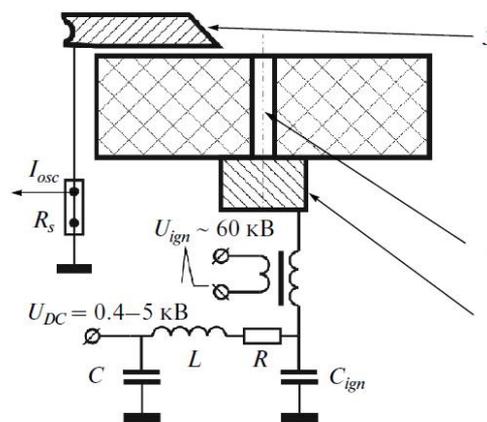
Замечание:

○ тороидальное вихревое кольцо возникает при

$$\nabla \rho \times \left(\nabla P - \frac{1}{c^2} [\vec{j} \times \vec{H}] \right) \neq 0$$

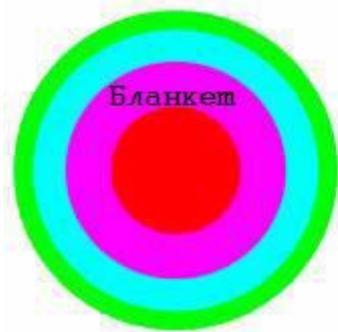
○ условие образования тороидального вихря (вихрь не образуется, если $\nabla P \approx \frac{1}{c^2} [\vec{j} \times \vec{H}]$) при наличии внешнего магнитного поля

$$t_{\text{вихр}} \approx \frac{\Omega_* \rho_* \varepsilon^*}{P_* \mp \frac{H_*^2}{8\pi}} < \min \left(t_{\text{ков}} \approx \frac{L_*}{V_*}, t_{\text{дифф}} \approx \frac{r_0^2}{\nu} \right)$$



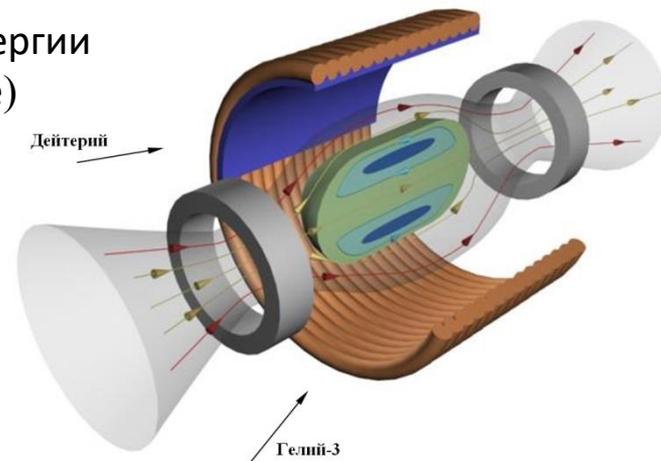
1 – разрядный канал (капилляр), 2 – внутренний электрод, 3 – наружный электрод

Альтернативные системы + улучшенное топливо + современные технологии



D-T и D-³He топливо

- высокое энерговыделение
- система прямого преобразования энергии
- простота (дешевле)
- высокое бета (отношение давления плазмы к давлению магнитного поля)



Режим нераспространения оружия массового уничтожения

Ближайшее будущее – источники нейтронов и протонов - производство медицинских изотопов, терапия рака, обнаружение взрывчатых и химических веществ.



В перспективе – небольшие ТЭС,

Среднесрочная – уничтожение ядерных отходов, освоение космоса (термояд. двигатели), материалов и производство H₂ и синтетического топлива

Применение термоядерных устройств



Область приложений расширится по мере улучшения скорости реакции

155 лет факультету «Энергомашиностроение»

МГТУ им. Н.Э. Баумана

(инженерно-механическое отделение Императорского московского технического училища, затем факультет «Тепловые и гидравлические машины» МВТУ им. Н.Э. Баумана)

Жуковский Н.Е.
Куколевский И.И.
Микулин А.А.
Бармин В.П.
Королев С.П.
Петляков В.М.
Феоктистов К.П.
Нигматулин Р.И.
Иноземцев Н.В.
Зернов П.М.
Леонтьев А.И.
Фарада С.Л.



Шухов В.Г.
Туполев А.Н.
Стечкин Б.С.
Доллежалъ Н.А.
Рамзин Л.К.
Лавочкин С.А.
Соловьев В.А.
Уваров В.В.
Брилинг Н.Р.
Мясищев В.М.
Леденёв Б.Н.
Голованов Я.К.

Монографии и учебники

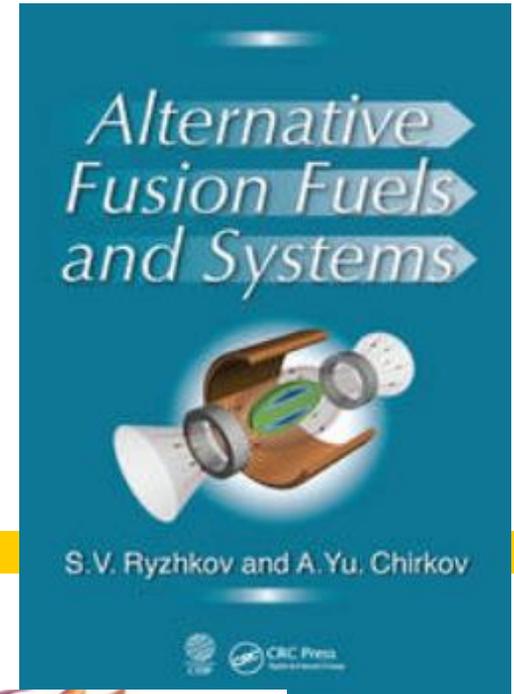


В.В. Кузенов, С.В. Рыжков

**ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ
И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ
МОДЕЛИ В ПЛОТНОЙ
И РАЗРЕЖЕННОЙ ПЛАЗМЕ**

Монография

**RU
sci**ence
RUS-SCIENCE.RU



Актуальность и важность работы

1. Междисциплинарность задач – аэродинамика, лазерная физика, прикладная математика, радиационная МГД, теплофизика, физика и техника плазмы и **мощные** энергетические установки.
2. Многоуровневый и **нестационарный** характер задач импульсных радиационных магнито-газодинамических (РМГД) систем.
3. Математическое моделирование **неравновесных** плазмо-газодинамических процессов в нестационарных магнитно-инерциальных термоядерных системах (МИТС) и импульсных РМГД системах и их практические приложения.
4. Разработка численных методов, используемых в прикладных задачах для систем с сильным **магнитным** (внешним и спонтанным) полем (МП).
5. Полученные фундаментальные научные результаты – основа для **новых**
производственных технологий!

Блок-схема алгоритма для решения системы уравнений радиационной магнитной газовой динамики



Расчет магнито-радиационных уравнений

Расчет термодинамических, спектрально-оптических и транспортных свойств индивидуальных веществ

Расчет спонтанных и внешних электромагнитных полей в термоядерной мишени

Кинетический расчет термоядерного горения топлива

Расчет поглощения лазерного и широкополосного излучения в термоядерной мишени

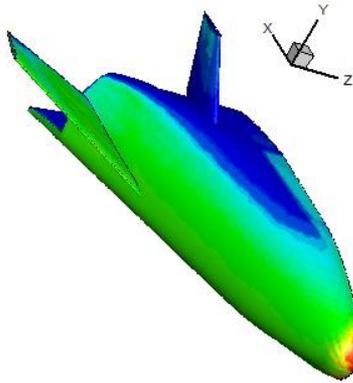
Расчет радиационно-магнитогазодинамических процессов в импульсных струях и ускорителях плазмы



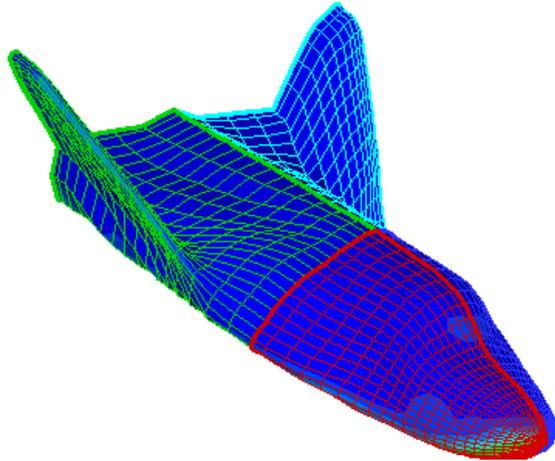
Основные научные результаты

- Сформулированы математические модели многоуровневой прикладной математики и импульсных радиационно-магнитогазодинамических (РМГД) систем.
- Разработана система вычислительных методов, которые могут быть использованы в прикладных задачах и импульсных РМГД системах.
- На основе расчетно-теоретических результатов показана перспективность применения импульсных плазменных и лазерных разрядов для инициации экстренного поджига и горения топливных смесей в газовых потоках.
- Показана возможность применения систем МИТС и геликонных источников ионов для создания высокоинтенсивных генераторов нейтронов.
- Разработана схема обжата замагниченного вещества плазменными и лазерными пучками с высокой энергией в импульсе в качестве энергетического реактора и источника нейтронов. Решены проблемы генерации и управления замагниченной мишенью в такой системе.
- Результаты фундаментальных исследований находят свое применение при оценках энергетических установок, источников частиц и ракетных двигателей на основе нагрева вещества лазерами и высокоскоростными плазменными струями во внешнем магнитном поле.

3D моделирование



Distribution of convective heat flow along the surface of an aircraft of the GLA X-33 type



Материал цилиндра – вольфрам, длина 100 мм, радиус 200 затупления $R = 1.27$ см. Число Маха в набегающем потоке $M = 6$. Цилиндр жестко заделан. Охлаждение за счёт излучения $\varepsilon = 0.28$.

Распределение температуры T [K] в затупленном по сфере цилиндре **Значительно превышает** $T_w = 300$ K, часто используемую при расчетах!

Расчеты были выполнены на компьютере с 4 ядерным процессором Intel i7-4720HQ 2600МГц / 16384МБ, время одного расчета в параллельной (OpenMP) версии программы 4 часа 30 мин. При этом характеристики расчетной сетки были следующие: число тетраэдров 2031575, число узлов в объемной сетке 374835, число фасеток на поверхности 118284.

При 3D тестировании использовались следующие параметры натекающего потока воздуха: Давление в натекающем потоке: $P=1120$ Па;
Скорость в натекающем потоке: $V=945$ м/с;
Температура в натекающем потоке: $T=62,1$ К;
Число Маха в натекающем потоке: $M=6$;

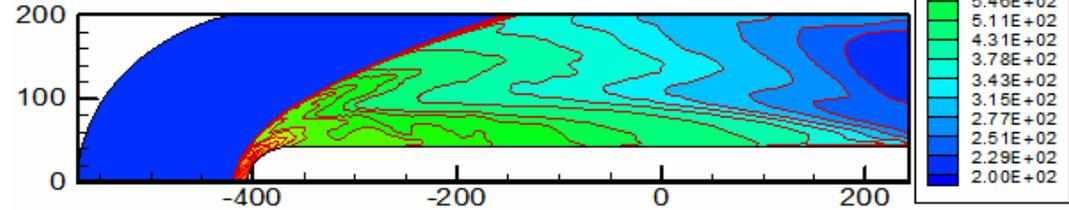


Рис. Распределение температуры при обтекании цилиндра, сопряженного с пластиной.

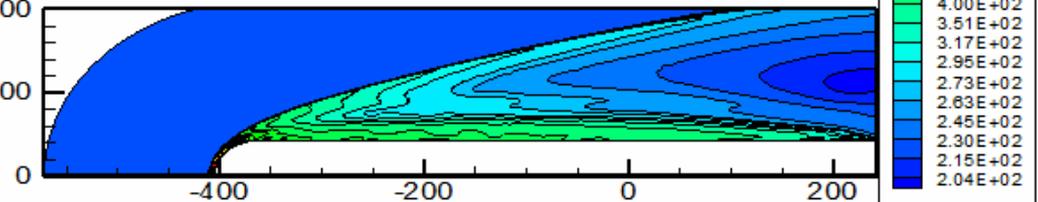
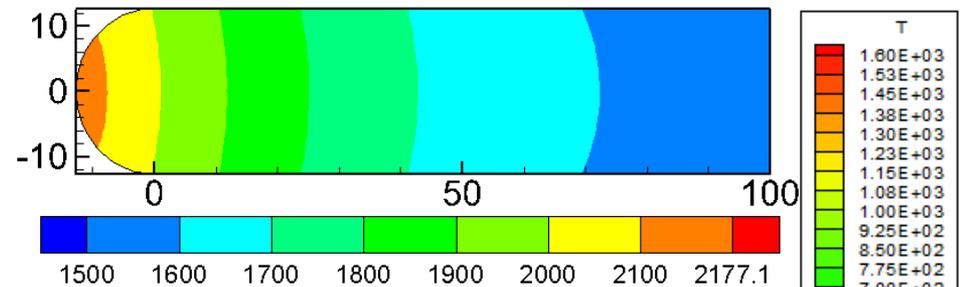


Рис. Распределение температуры при обтекании сферы, сопряженной цилиндром. 43

Выводы - миссии

Рассмотрен широкий класс физических моделей и разработаны научно-технические основы для мощных энергетических систем и установок в виде конкретных схем и цифр (*бауманский подход*).

Научно-технические основы для обширного класса устройств – генераторы нейтронов, источники протонов, мощные источники энергии, обработка материалов, лазерные технологии и т.д.

Научный задел позволяет раньше ввести в **практический обиход** предложенные принципиальные схемы и концептуальные решения.

Главный результат – показаны возможности и **эффективность наших систем** (результаты использованы экспериментаторами).

Создан *мощный фундамент* – для перспективных технологий.

Спасибо!

Контакты **Д.ф.-м.н., профессор С.В. Рыжков**

Факультет «Энергомашиностроение» (Э6)

МГТУ им. Н.Э. Баумана

E-mail: svryzhkov@bmstu.ru

