



**РОСАТОМ**

**Р Ф Я Ц  
ВНИИЭФ**

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

# **ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ СО СЖАТИЕМ ЗАМАГНИЧЕННОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ ТОКОМ ВЗРЫВОМАГНИТНОГО ГЕНЕРАТОРА**

**С.Г. Гаранин, А.В. Ивановский, С.М. Куликов, В.И. Мамышев, С.Н. Певный, В.Г. Рогачев**

**e-mail: [ivanovsky@elph.vniief.ru](mailto:ivanovsky@elph.vniief.ru)**

**Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ)**

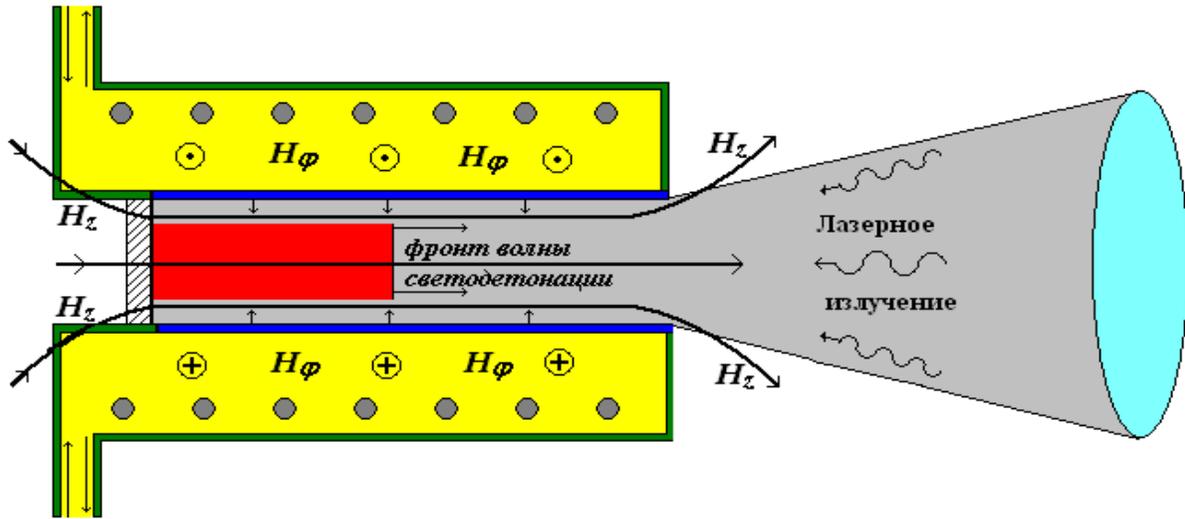
**Доклад на XIV международной конференции  
«Забабахинские научные чтения»**

**18-22 марта 2019 г.**

**Снежинск, Челябинской области, Россия**

# Схема экспериментов

Ток от ВМГ



Ток от ВМГ

	ДД или ДТ газ
	Плазма
	Заглушка
	Линза
	Лайнер
	Обратный токопровод
	Изолятор
	Соленоид

- ДД или ДТ газ помещен в однородное магнитное поле соленоида.
- Лазерное излучение формирует и разогревает ДД или ДТ плазму до температуры в сотни электронвольт.
- Ускоренный ток от ВМГ лайнер сжимает плазму в ~ 20 раз по радиусу за время ~ 1 мкс.

Контакт плазмы с лайнером исключен в силу малости плазменного параметра

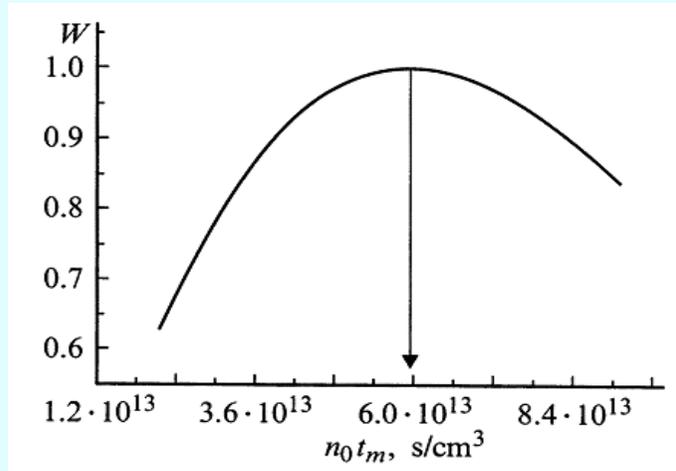
$$\beta = 8\pi r / H_z^2 < 1.$$

## Условия зажигания

Для зажигания 50%T-50%D плазмы с массой  $M$  необходимо выполнение условия  
(Вахрамеев Ю.С., Мохов В.Н., Попов Н.А.//Атомная энергия. 1980. Т.49. Вып. 2. С.121-122)

$$W = \frac{1}{M} \iint \frac{Q_{nf}}{E_T} dV dt = 0.3 - 1,$$

где  $W$  – дупль,  $Q_{nf}$  – мощность энерговыделения  $\alpha$  частиц,  $E_T$  – удельная энергия сжимаемой плазмы без учета термоядерного энерговыделения.



- Зависимость  $W$ <sup>1)</sup> от  $n_0 \cdot t_m$ , где  $n_0$  – концентрации частиц ДТ топлива,  $t_m$  – время нарастания тока, при допустимых сжатиях  $\delta \leq 20$ <sup>2)</sup> и начальной температуре  $T_0 = 230$  эВ представлена на рисунке.

- При высоте плазменного шнура  $h_0 \geq 10$  см и  $t_m \sim 1$  мкс теплопроводность и разгрузка в продольном направлении снижает величину  $W$ , но не более, чем в 2 раза.

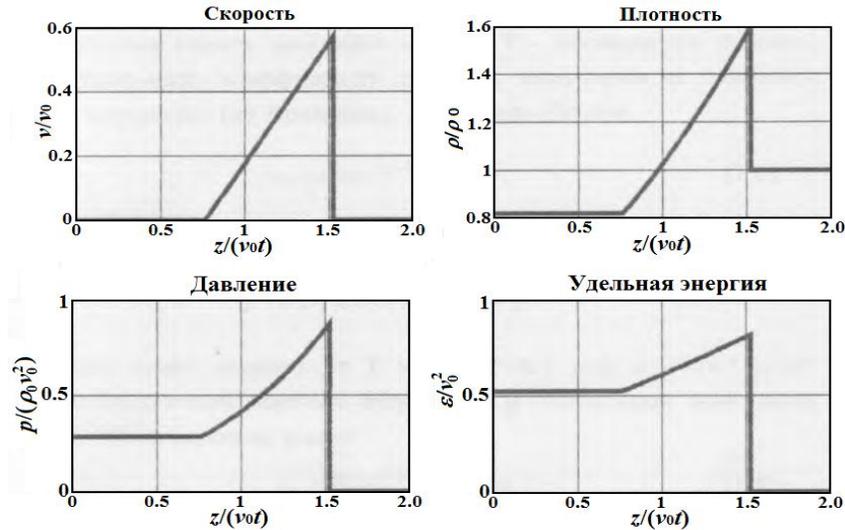
Оптимальное значение  $n_0 \cdot t_m \sim 6 \cdot 10^{13} \text{ с/см}^3$  при  $T_0 \sim 230$  эВ.

<sup>1)</sup> В.Ф. Ермолович, А.В. Ивановский, А.П. Орлов и др. //ЖТФ, т.70, вып. 10, 2000г.

<sup>2)</sup> Установка “Saturn” (СНЛ) -Felber F.S., Malley M.M., Wessel F.J. et al.//Phys. Fluids. 1988. Vol. 31. N 7. P. 2053.

# Создание плазмы

При  $\beta \ll 1$  реализуется режим плоской волны светодетонации<sup>1)</sup>. Зависимости скорости  $v$ , плотности  $\rho$ , давления  $p$  и удельной энергии  $\varepsilon$  плазмы ( $\gamma=5/3$ ) от координаты  $z$  представлены на рисунке.



$(v_0 = [Q / (\tau \rho_0)]^{1/3}; Q, \tau$  – флюенс и длительность ЛИ)

Условие реализации – пробег ЛИ  $l_v \ll h_0$ .

**В ВФДЛ реализованы:**

- энергия ЛИ 60 кДж за время 25 мкс
- в системе с задающим генератором и предусилителем - энергия ЛИ 7 кДж за время 5 нс.

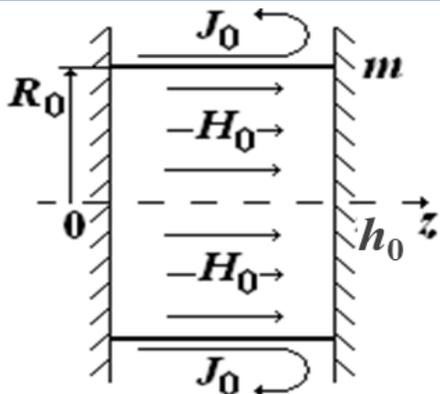
Пробег ЛИ для ВФДЛ ( $\lambda=1.3$  мкм) составляет  $l_v = 3.26 \cdot 10^{-7} \cdot T_0^{3/2} / \rho_0^2 = 0.16$  см  $\ll h_0$ .

Из соотношений для волны светодетонации:  
 $T_0 = 1.69 \cdot 10^{-7} \cdot [Q / (\rho_0 \tau)]^{2/3}; h_0 = v_0 \cdot \tau = 80 \cdot T_0^{1/2} \cdot \tau,$   
 и условий зажигания  
 $\rho_0 \cdot t_m = 2.5 \cdot 10^{-4}$  г·мкс/см<sup>3</sup>,  $T_0 = 0.25$  кэВ

при времени нарастания тока  $t_m = 1$  мкс и высоте плазмы  $h_0 = 10$  см

получаем требуемые для зажигания:  
 плотность  $\rho_0 = 2.5 \cdot 10^{-4}$  г/см<sup>3</sup>;  
 длительность ЛИ  $\tau = 0.25$  мкс;  
 флюенс ЛИ  $Q = 112.5$  кДж/см<sup>2</sup>.

<sup>1)</sup> Райзер Ю.П. Основы современной физики газоразрядных процессов. М. Наука, 1980



## Уравнения движения

$$\begin{cases} \frac{dR}{dt} = v, \\ m \cdot \frac{dv}{dt} = -\frac{J^2}{100R} + \frac{R}{4} \cdot (H^2 - H_0^2), \\ H = \frac{R_0^2}{R^2} \cdot H_0, \quad J = \frac{L_0}{L_0 + 2 \cdot h_0 \cdot \ln(R_0/R)} \cdot J_0. \end{cases}$$

$$\begin{aligned} [R] &= \text{см}; [t] = \text{мкс}; [v] = \text{см/мкс}; [m] = \text{г/см}; \\ [J] &= \text{МА}; [H] = \text{МГс}; [L] = \text{нГн}. \end{aligned}$$

## Предельное сжатие

Умножим первое на второе и интегрируем по  $dt$  с учетом  $v|_{t=0} = 0$ ;  $R|_{t=0} = R_0$

$$\frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{L_0 J_0^2}{100} \cdot \frac{\ln(R_0/R)}{L_0 + 2 \cdot h_0 \cdot \ln(R_0/R)} + \frac{H_0^2 R_0^2}{8} \cdot \left( 2 - \frac{R^2}{R_0^2} - \frac{R_0^2}{R^2} \right)$$

В момент максимального сжатия  $v = 0$ ,  $R_0/R = \delta \rightarrow 0 = \frac{L_0 J_0^2}{25} \cdot \frac{\ln(\delta)}{L_0 + 2 \cdot h_0 \cdot \ln(\delta)} + \frac{H_0^2 R_0^2}{2} \cdot \left( 2 - \frac{1}{\delta^2} - \delta^2 \right)$

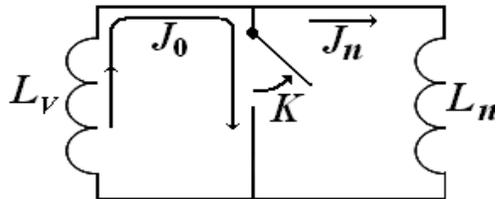
$$\text{При } \delta \rightarrow \infty \quad \delta = \frac{1}{5} \frac{J_0}{H_0 R_0} \cdot \sqrt{\frac{L_0}{h_0}} = \sqrt{\frac{E_{\text{emg}}}{E_{\text{sol}}}}.$$

Для условий зажигания  $\rho_0 \cdot t_m = 2.5 \cdot 10^{-4}$  г·мкс/см<sup>3</sup>,  $T_0 = 0.25$  кэВ равенство  $\beta = 8\pi \cdot 2n_0 kT_0 / H_0^2 = 1$  обеспечивается при  $H_0 = 1.1$  МГс.

При начальном радиусе  $R_0 = 1$  см и погонной индуктивности  $L_0/h_0 = 2$  нГн/см сжатие  $\delta = 20$  реализуется током  $J_0 \sim 80$  МА.

## Система импульсной мощности на базе сверхмощного дискового ВМГ

- Начальная индуктивность 15 элементного ДВМГ  $\varnothing$  1м ~ 360 нГн, ток ~12 МА.
- При работе на индуктивность ~ 20 нГн при сохранении потока ~ 0.8 от начального, ток составит ~ 173 МА за время ~10 мкс.



При коммутации тока из индуктивного накопителя в нагрузку с равной индуктивностью ток делится пополам  $J_n = J_0/2$ , энергия уменьшается в четыре раза.

Схема коммутации

Электровзрывные фольговые размыкатели тока способны коммутировать ток за время ~ 1 мкс.

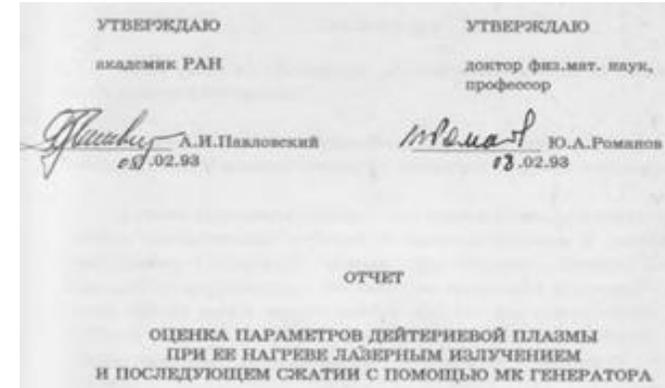
Технологии взрывной импульсной мощности на базе ДВМГ позволяют сжать плазму током ~ 90 МА за время ~ 1 мкс.



5-элементный  
ДВМГ  $\varnothing$  1 м

**1993 г.** Предложена схема разогрева замагниченной плазмы ЛИ и последующим сжатием с помощью генератора МК-1 (А.И. Павловский, В.Г. Рогачев, В.А. Павловский).

**1999 г.** Предложено сжимать плазму в геометрии Z-⊖ пинча. Показана возможность устойчивого сжатия до 30 раз по радиусу. (В.Ф. Ермолович, А.В. Ивановский, А.П. Орлов «Об устойчивости квазиadiaбатического сжатия плазмы продольным магнитным полем» ВАНТ сер. Теор. и прикл. физика. Вып.1, 1999г.).



**2000 г.** Оценены параметры для зажигания в схеме сжатия в геометрии Z-⊖ пинча (В.Ф. Ермолович, А.В. Ивановский, А.П. Орлов и др. «К вопросу о квазиadiaбатическом сжатии плазменного шнура продольным магнитным полем» ЖТФ, т.70, вып. 10, 2000г.).

**2009г.** Начало разработки концепции зажигания в геометрии Z-⊖ пинча на установке Z с разогревом плазмы лазерной установкой Z-Beamlet (проект MagLIF) (Slutz S.A., Herrmann M.C., Vesey R.A. et al. Pulsed-power-driven cylindrical liner implosions of laser preheated fuel magnetized with an axial field//Phys. Plasmas. 2010. V.17. no.5, Slutz S.A., Vesey R.A. High-gain magnetized inertial fusion//Phys. Rev. Lett. 2012. Vol. 108. No. 2.).

**2014г.** Первые эксперименты на установке Z с выходом нейтронного излучения  $\sim 2 \cdot 10^{12}$  в ДД-реакции (M. R. Gomez, S. A. Slutz, A. B. Sefkow et al. Experimental demonstrations of fusion-relevant conditions in magnetized liner inertial// Phys. Rev. Lett. 2014. Vol. 113. N<sub>o</sub>. 15. 155003).

Предварительный нагрев ДД плазмы возможен взрывным фотодиссоционным лазером (ВФДЛ) с длиной волны  $\lambda = 1.3$  мкм.

Для создания плазменного шнура с температурой  $T_0 = 0.1$  кэВ и высотой  $h_0 = 10$  см необходим импульс ЛИ длительностью  $\tau = 1/80 \cdot h_0/T_0^{1/2} = 0.4$  мкс.

При плотности плазмы  $\rho_0 = 8 \cdot 10^{-5}$  г/см<sup>3</sup> пробег излучения  $l_\nu = 4.9 \cdot 10^{-9} \cdot T_0^{3/2} / \rho_0^2 \cdot (10.6/\lambda)^2 = 1.6$  см  $\ll h_0$ .

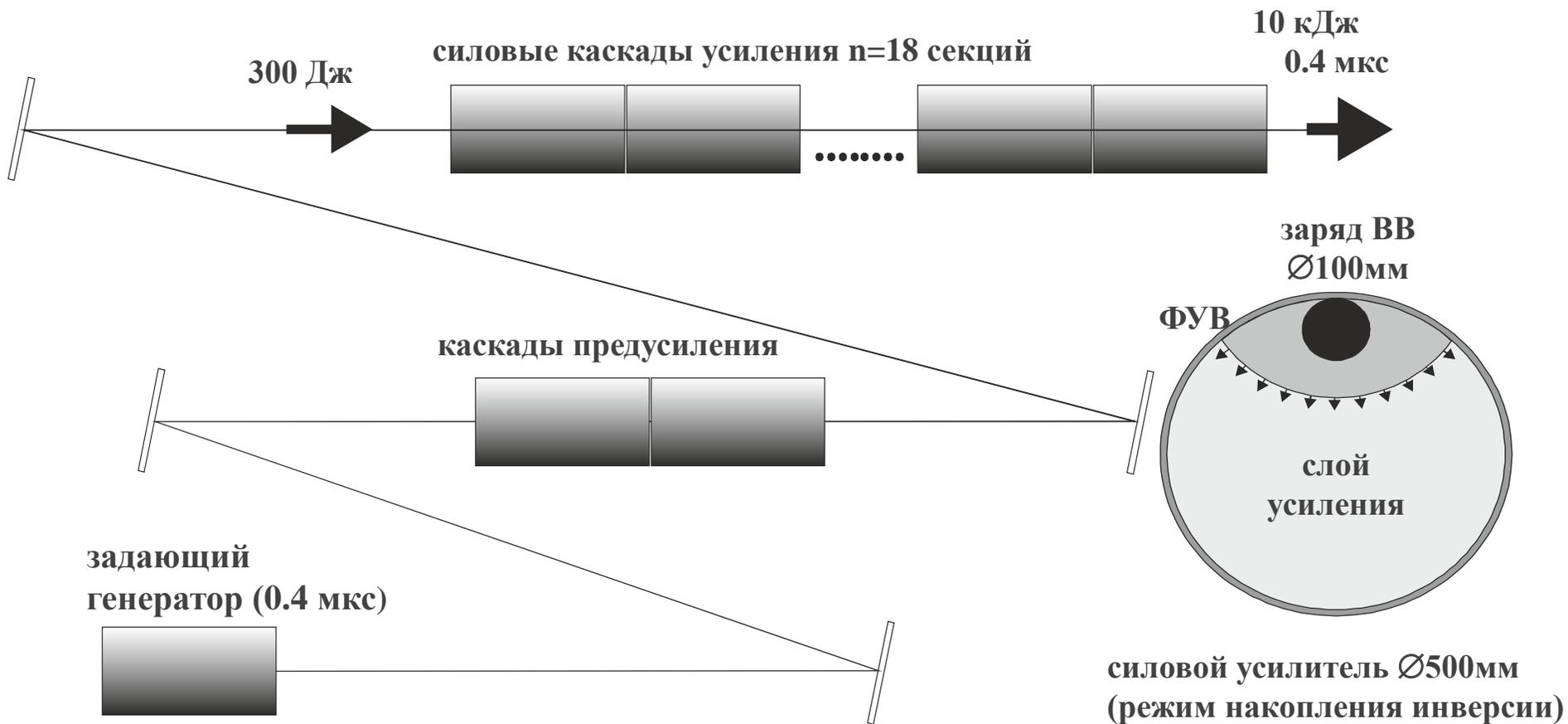
Требуемая энергия ЛИ –  $E = \pi r_0^2 \cdot Q$ , где  $Q$  определяется из  $T_0 = 1.69 \cdot 10^{-7} \cdot [Q/(\rho_0 \tau)]^{2/3}$ , при радиусе плазменного шнура  $r_0 = 0.5$  см составляет  $E = 11$  кДж.

Начальное магнитное поле  $H_0 = 4 \cdot (\pi n_0 k T_0 / \beta)^{1/2}$  при плазменном параметре  $\beta = 1$  составляет  $H_0 = 440$  кГс.

Из условия  $\delta = \frac{1}{5} \frac{J_0}{H_0 R_0} \cdot \sqrt{\frac{L_0}{z_0}}$  получаем амплитуду тока  $J_0$  для сжатия в  $\delta \sim 20$  раз плазменного шнура лайнером с начальным радиусом  $R_0 = 1$  см –  $J_0 \sim 30$  МА.

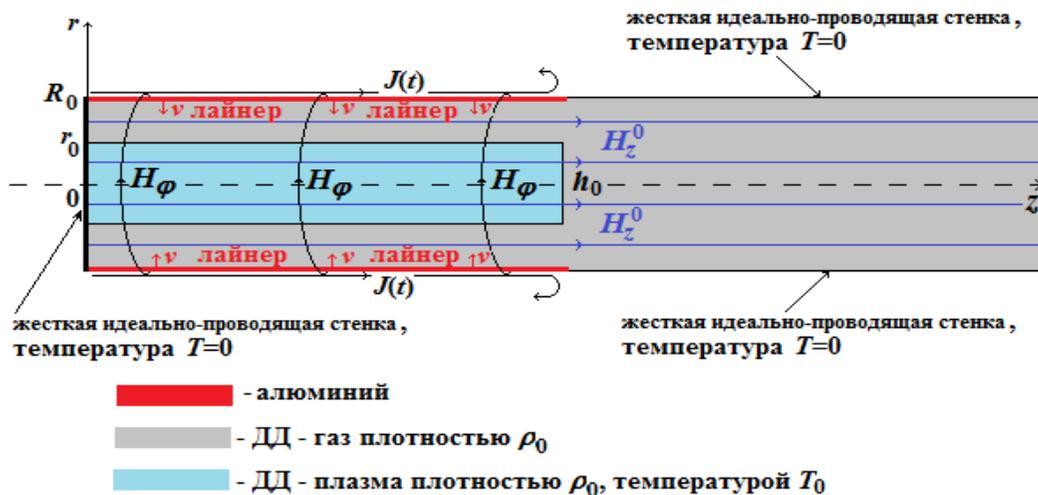
Сжатие плазмы за время  $\sim 1$  мкс током с амплитудой  $\sim 30$  МА реализуется 30 элементным дисковым ВМГ  $\varnothing 0.4$  м с фольговым гофрированным размыкателем тока.

# Лазерная система на базе ВФДЛ с энергией 10 кДж и длительностью ~ 0.4 мкс



В аналогичной системе реализована энергия ЛИ 7 кДж за время 5 нс.

## Расчетная геометрия

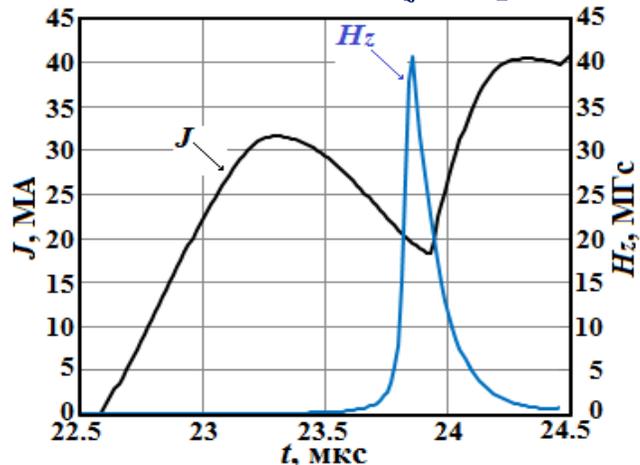


## Начальные параметры:

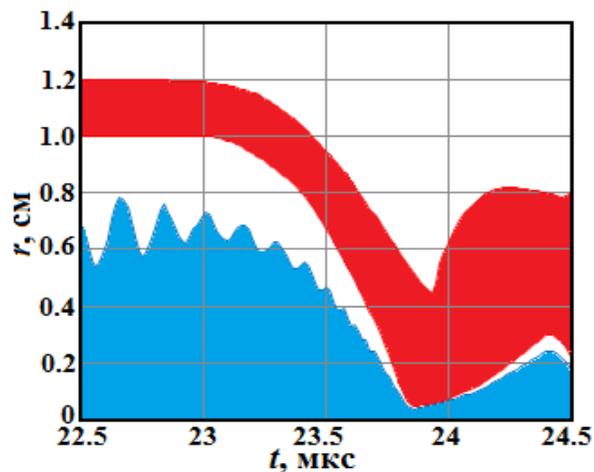
- радиус лайнера  $R_0=1$  см;
- радиус плазмы  $r_0=0.5$  см;
- высота плазмы  $h_0=10$  см;
- температура плазмы  $T_0=0.1$  кэВ;
- плотность плазмы (газа)  $\rho_0=8 \cdot 10^{-5}$  г/см<sup>3</sup>;
- магнитное поле  $H_z^0=180$  кГс;
- погонная масса лайнера  $m=3.7$  г/см.

Расчеты проводились в приближении одножидкостной, однотемпературной МГД в одномерной  $(r, t)$  и двумерной  $(r, z, t)$  постановках с учетом потерь на тормозное излучение и теплопроводности как вдоль, так и поперек силовых линий магнитного поля.

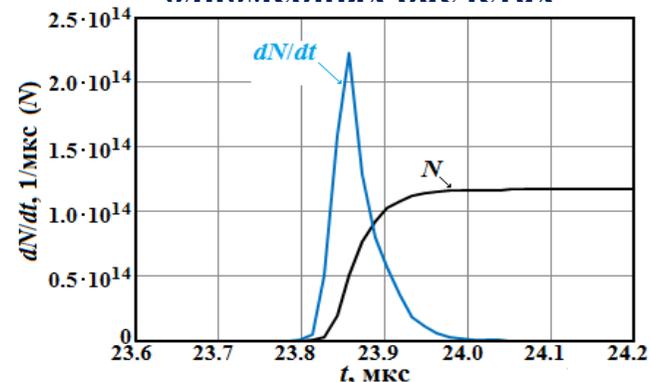
Зависимости тока  $J$  и продольного магнитного поля  $H_z$  от времени



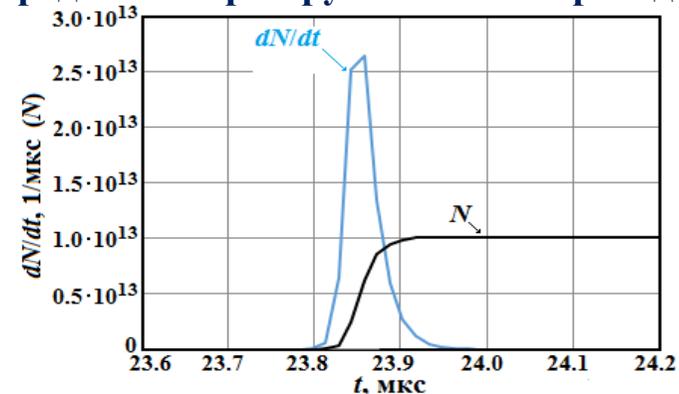
$R-t$  диаграмма движения лайнера и поверхности плазмы



Выход нейтронного излучения в одномерных расчетах



Выход нейтронного излучения с учетом продольных разгрузки и теплопроводности



При сжатии в  $\sim 15$  раз по радиусу в одномерных расчетах выход ДД нейтронов  $\sim 10^{14}$ . Учет продольных разгрузки и теплопроводности снижает выход нейтронов примерно на порядок.

- 1. Технологии взрывомагнитных генераторов и взрывных фотодиссоционных лазеров позволяют достичь порога зажигания при сжатии предварительно нагретой замагниченной дейтерий-тритиевой плазмы.**
- 2. Для отработки схемы зажигания необходимы эксперименты с ДД плазмой, с применением модельных лазерных систем и ВМГ.**