



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

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

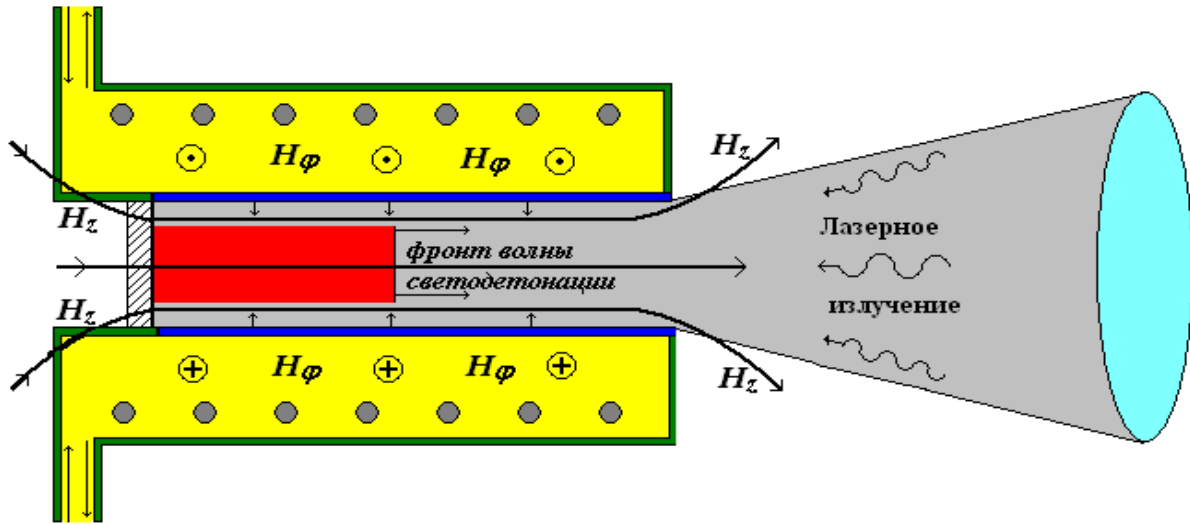
**Доклад на XIV международной конференции
«Забабахинские научные чтения»**

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

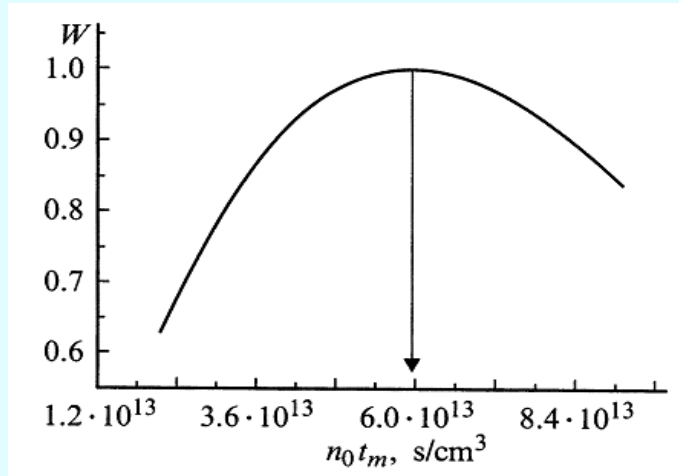
$$\beta = 8\pi r / H_z^2 < 1.$$

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 α частиц, E_T – удельная энергия сжимаемой плазмы без учета термоядерного энерговыделения.



- Зависимость W ¹⁾ от $n_0 \cdot t_m$, где n_0 - концентрации частиц ДТ топлива, t_m - время нарастания тока, при допустимых сжатиях $\delta \leq 20$ ²⁾ 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.

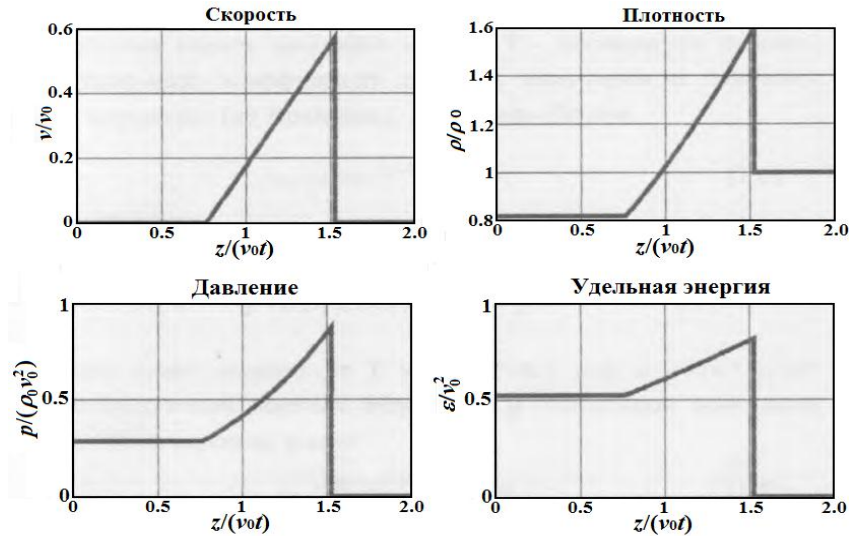
Оптимальное значение $n_0 \cdot t_m \sim 6 \cdot 10^{13} \text{ с/см}^3$ при $T_0 \sim 230$ эВ.

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

²⁾ 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 светодетонации¹⁾. Зависимости скорости v , плотности ρ , давления p и удельной энергии ε 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.

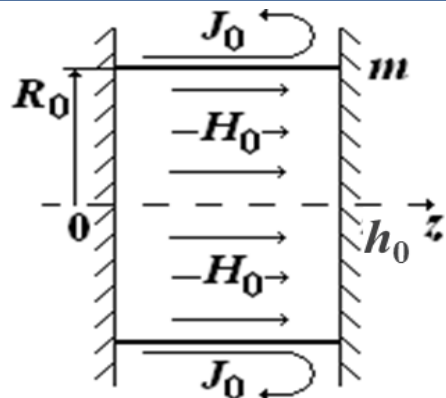
Пробег ЛИ для ВФДЛ ($\lambda=1.3$ мкм) составляет $l_v = 3.26 \cdot 10^{-7} \cdot T_0^{3/2} / \rho_0^2 = 0.16$ см $\ll h_0$.

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/см³, $T_0 = 0.25$ 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/см³;
 длительность ЛИ $\tau = 0.25$ мкс;
 флюенс ЛИ $Q = 112.5$ кДж/см².

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

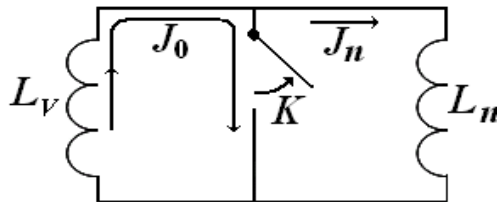
$$\text{При } \delta \rightarrow \infty \quad \delta = \frac{1}{5} \frac{J_0}{H_0 R_0} \cdot \sqrt{\frac{L_0}{h_0}} = \sqrt{\frac{E_{\text{emg}}}{E_{\text{sol}}}}.$$

Для условий зажигания $\rho_0 \cdot t_m = 2.5 \cdot 10^{-4}$ г·мкс/см³, $T_0 = 0.25$ 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_o. 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/см³ 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 $\ll h_0$.

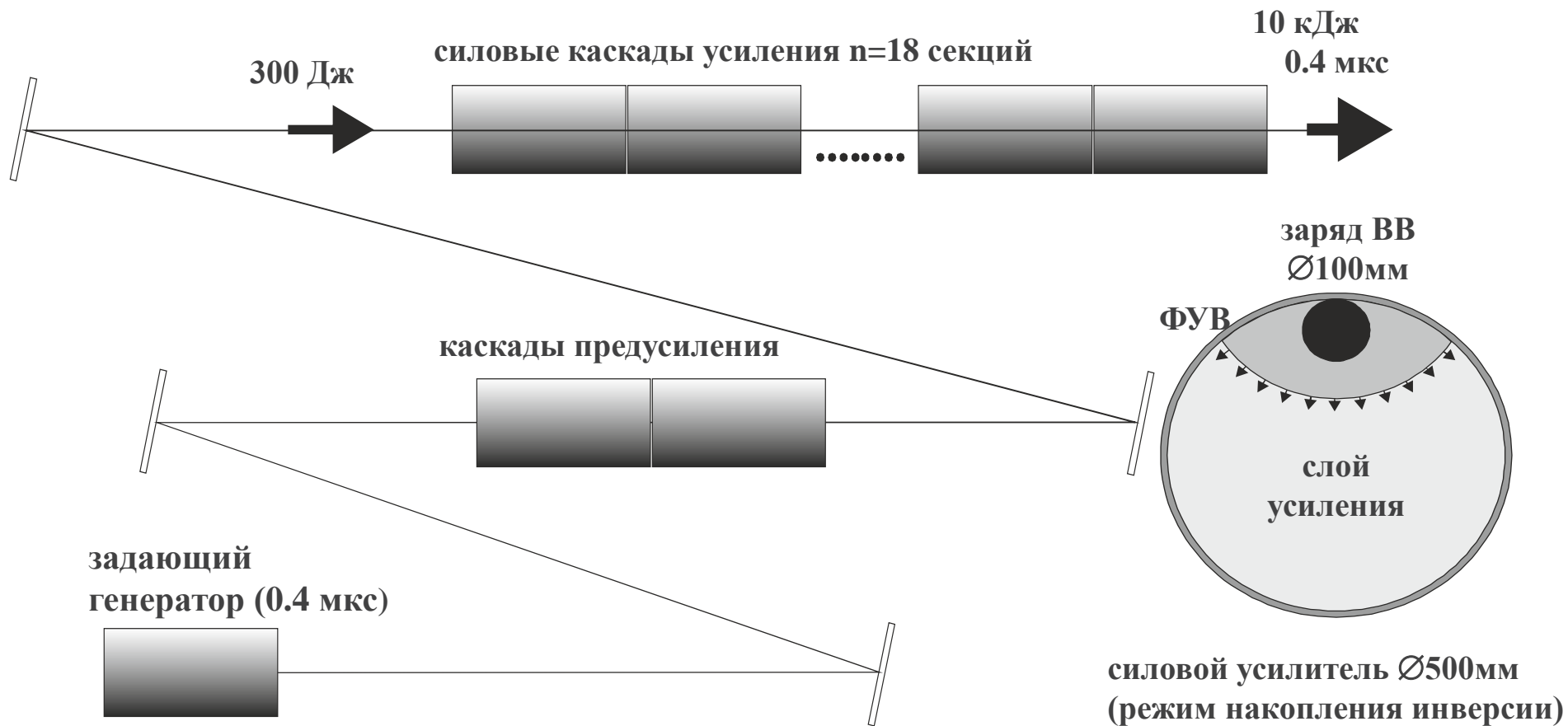
Требуемая энергия ЛИ – $E = \pi r_0^2 \cdot Q$, где Q определяется из $T_0 = 1.69 \cdot 10^{-7} \cdot [Q/(\rho_0 \tau)]^{2/3}$, при радиусе плазменного шнура $r_0 = 0.5$ см составляет $E = 11$ кДж.

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.

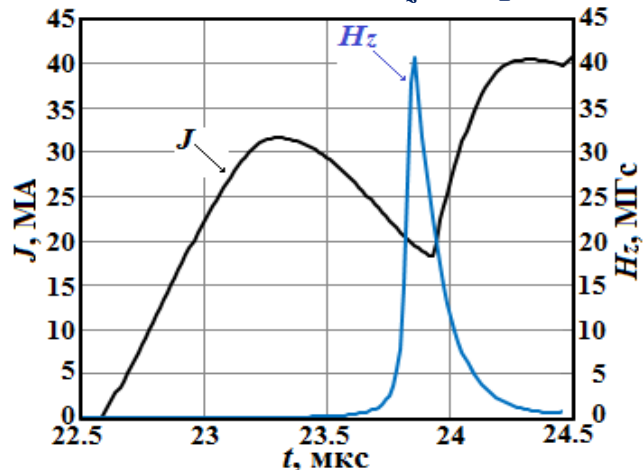
Сжатие плазмы за время ~ 1 мкс током с амплитудой ~ 30 МА реализуется 30 элементным дисковым ВМГ $\varnothing 0.4$ м с фольговым гофрированным размыкателем тока.

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

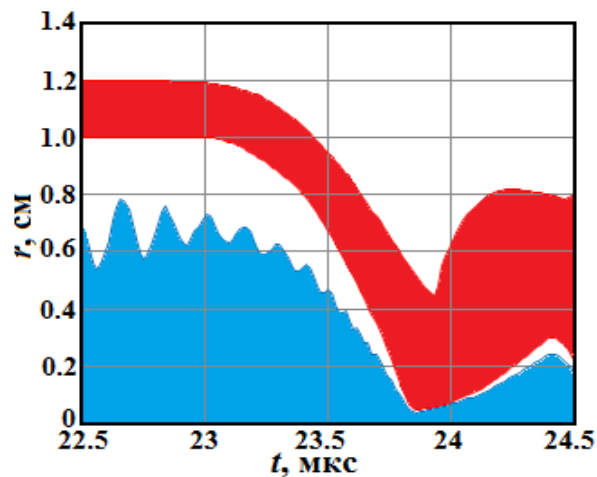


В аналогичной системе реализована энергия ЛИ 7 кДж за время 5 нс.

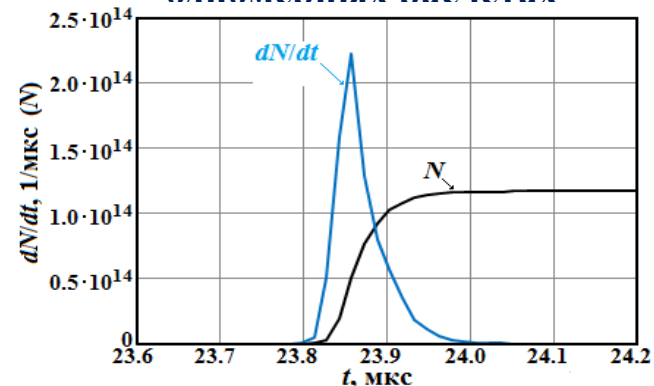
Зависимости тока J и продольного магнитного поля H_z от времени



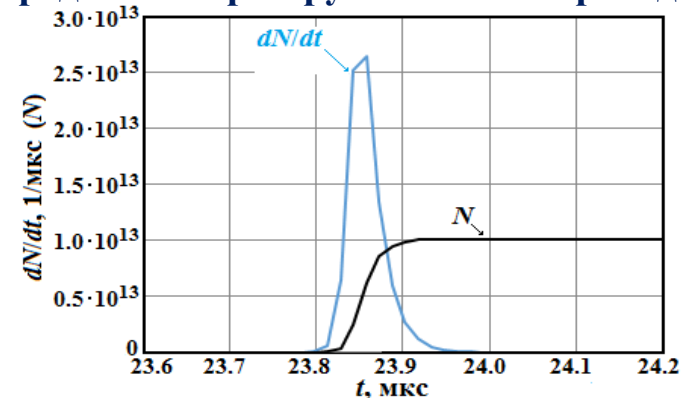
$R-t$ диаграмма движения лайнера и поверхности плазмы



Выход нейтронного излучения в одномерных расчетах



Выход нейтронного излучения с учетом продольных разгрузки и теплопроводности



При сжатии в ~ 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.**