

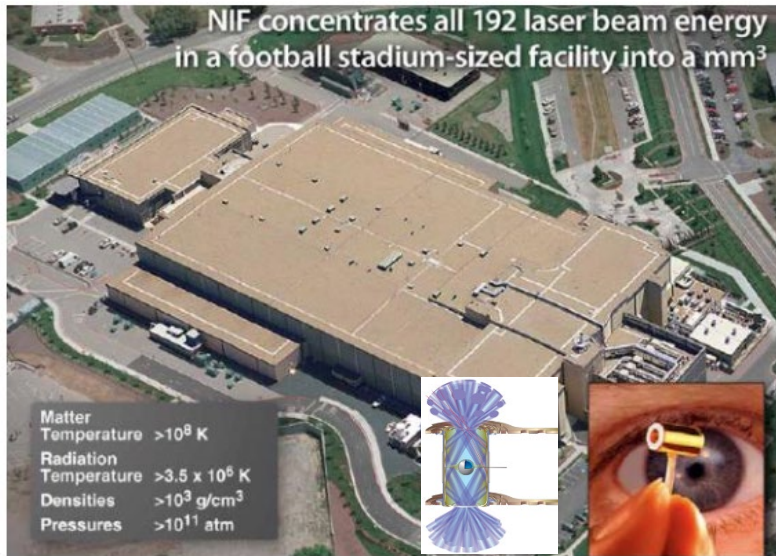
# КОНКРЕТНЫЕ КОНФИГУРАЦИИ СИЛЬНОГО СЖАТИЯ ГАЗА И НЕКОТОРЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО МИШЕНЯМ ДЛЯ ЛТС

**С.П. Баутин, Ю.В. Николаев, Е.И. Понькин**  
**СФТИ НИЯУ МИФИ, ПО «МАЯК»**



## Сжатие DT-мишеней для реализации лазерного термоядерного синтеза (ЛТС)

В Ливерморской лаборатории  
(США) установка NIF



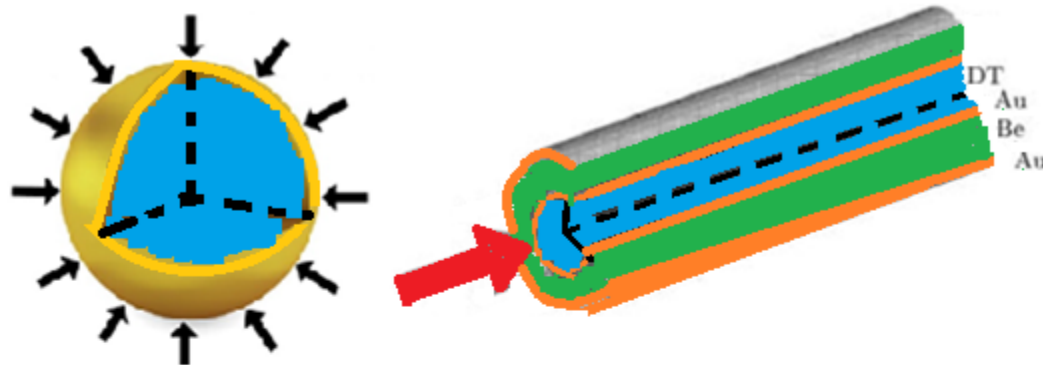
Во ВНИИЭФ установка «Искра»



Цена создания установки принципиально  
больше цены изготовления мишени

**Цель доклада:** используя свойства конкретных решений системы уравнений газовой динамики высказать некоторые **рекомендации по мишеням для ЛТС.**

1) «сжатие снаружи»:



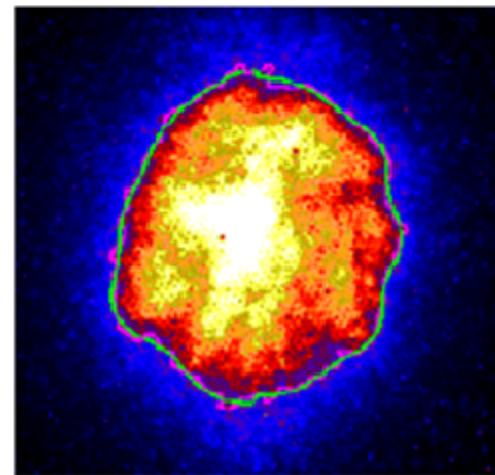
радиус кривизны сжимающей поверхности стремится к нулю.

$$t \rightarrow t_* \Rightarrow r_p(t) \rightarrow 0$$

$r_p(t)$  – траектория сжимающего поршня,

$t_*$  – момент сильного сжатия

Возможно именно этот факт является основной причиной неустойчивости сжатия при ЛТС.

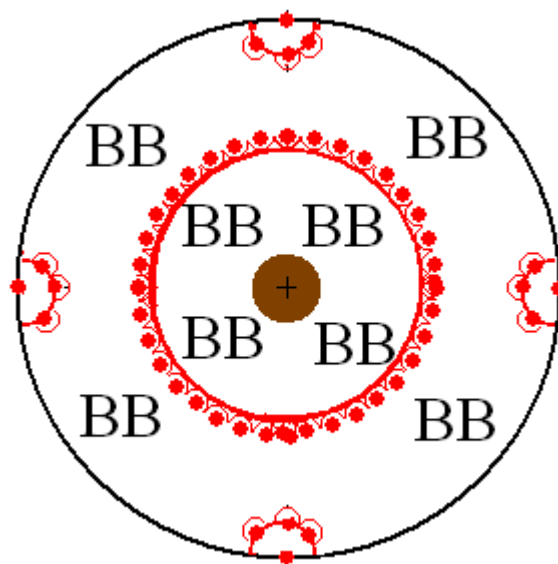


При сжатии детонационной волной происходит самосимметризация сжимающей поверхности.

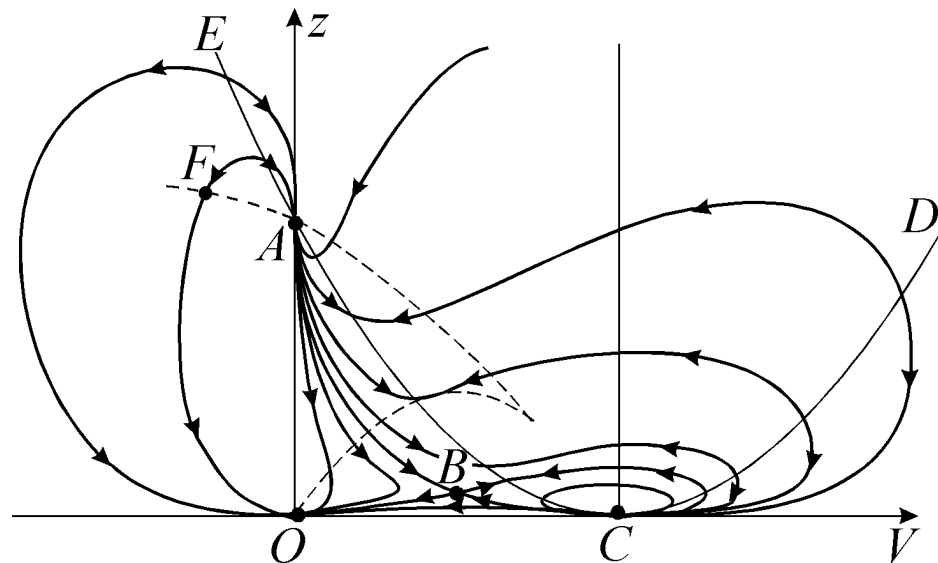
При сжатии лазерным воздействием эффекта самосимметризации нет.

«Барьеры» в мышлении об использовании только шаровой мишени поставили два таких факта:

а) самосимметризация и поэтому устойчивость схождения сферических и цилиндрических детонационных волн;



б) наличие автомодельных решений Л.И. Седова, описывающих безударное сжатие сферических и цилиндрических объемов газа.



# Неустойчивость сжатия мишеней на установке NIF

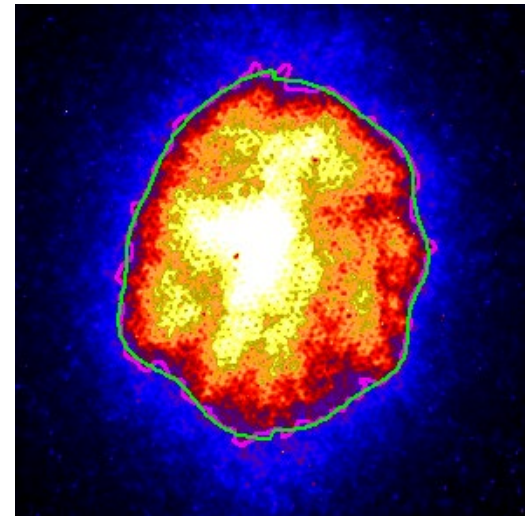
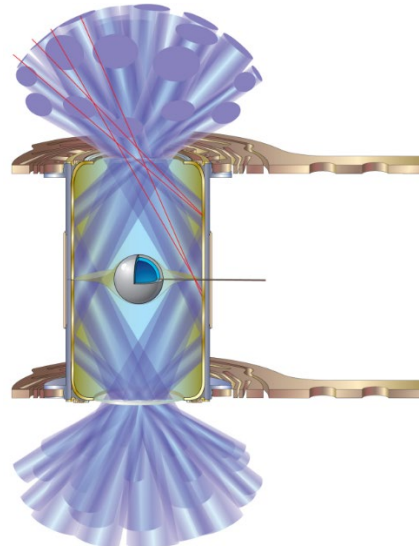
(выводы, сделанные американцами)

Основные причины отсутствия регулярного экспериментального зажигания:

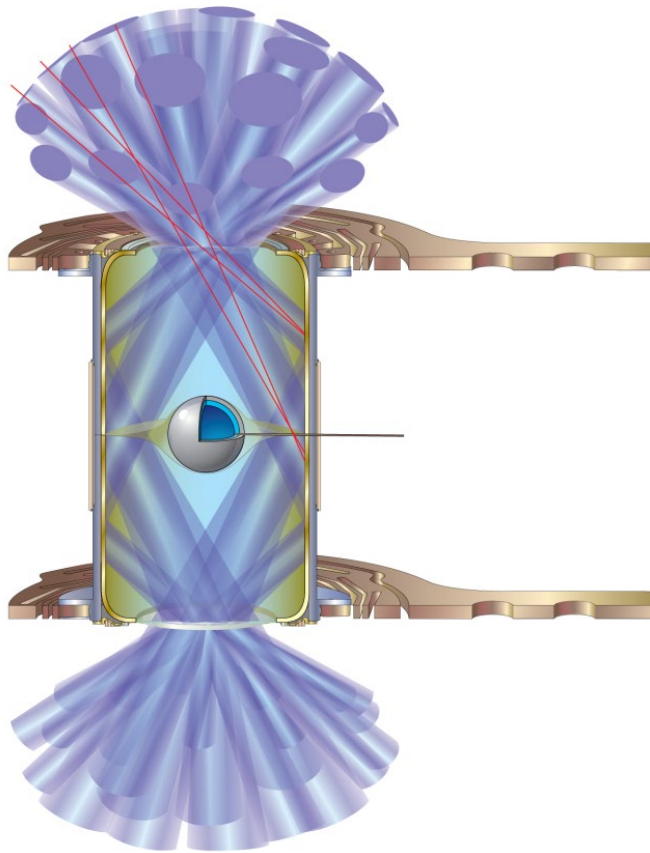
неоднородность внешнего воздействия на поверхность мишени, что приводит к развитию возмущений на внешней границе мишени и это нарушает симметрию сжатия к моменту времени возможной работы мишени;

на неоднородность сжатия также влияет подвес, который удерживает мишень в боксе;

Также важны временные характеристики лазерного облучения.



# Рекомендации по уменьшению неоднородности внешнего воздействия



- Контейнер для мишени  
делать сферическим
- Делать большее число мест  
вложения лазерного излучения

# Рекомендации по изменению геометрии мишеней

Мишень в виде шара или цилиндра эффективна, только когда внешнее воздействие имеет свойство самосимметризации.



при

$$r \rightarrow 0$$

$$\frac{h}{r} \not\rightarrow 0$$

простейшее проявление  
неустойчивости

## Доказанные (!) математические факты:

Неустойчивость фокусирующихся течений сжатия как в случае фокусировке ударной волны:

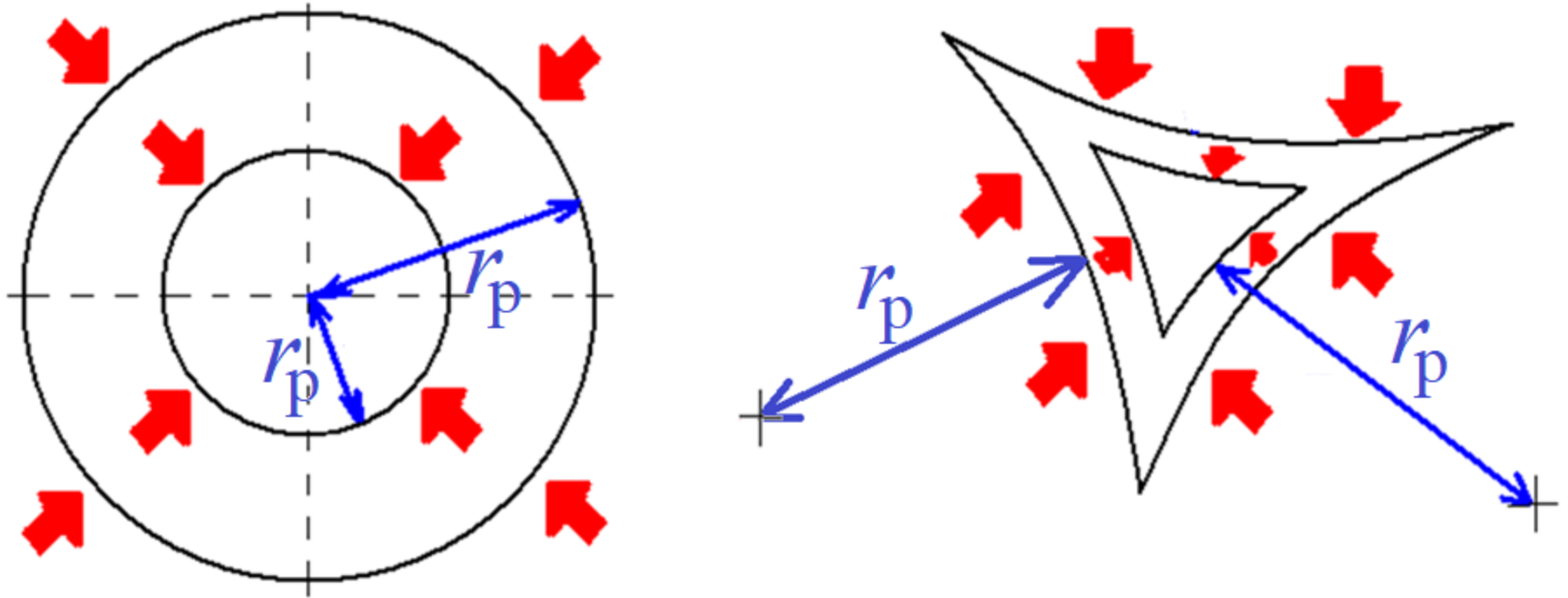
Брушлинский К.В. Неустойчивость сходящейся сферической ударной волны // ЖВММФ, 1982;

так и при фокусировке течений со слабыми разрывами:

Баутин С.П., Дерябин С.Л. Математическое моделирование истечения идеального газа в вакуум. Новосибирск: Наука, 2005.

Баутин С.П. Математическое моделирование сильного сжатия газа. Новосибирск: Наука, 2007.

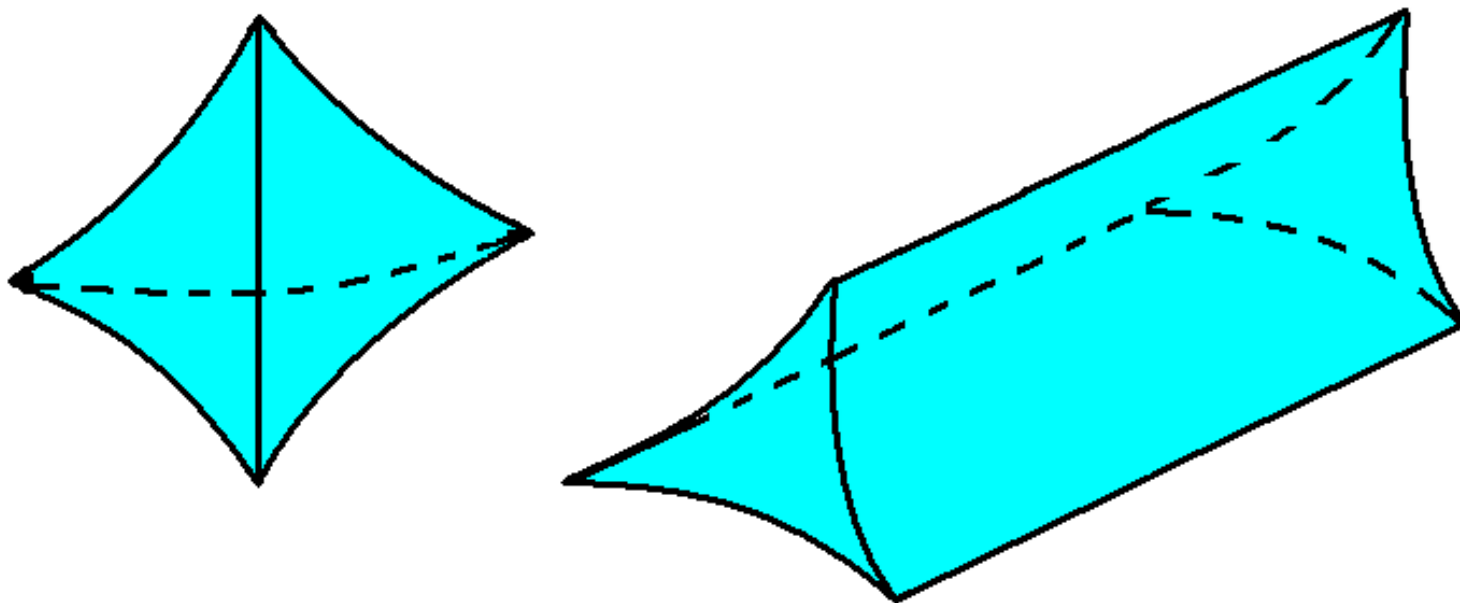
# Изменения геометрии мишеней



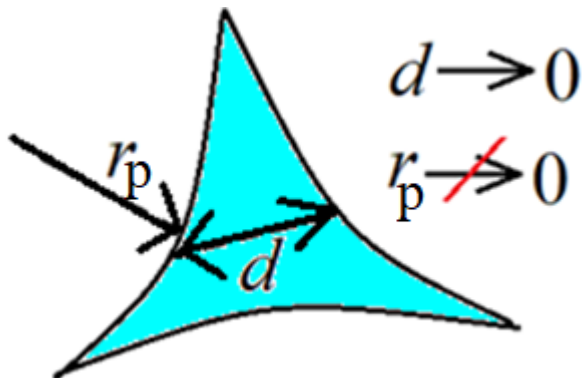
Существенно **более устойчивым** будет сжатие объема, у которого **радиусы кривизны при сжатии не убывают.**



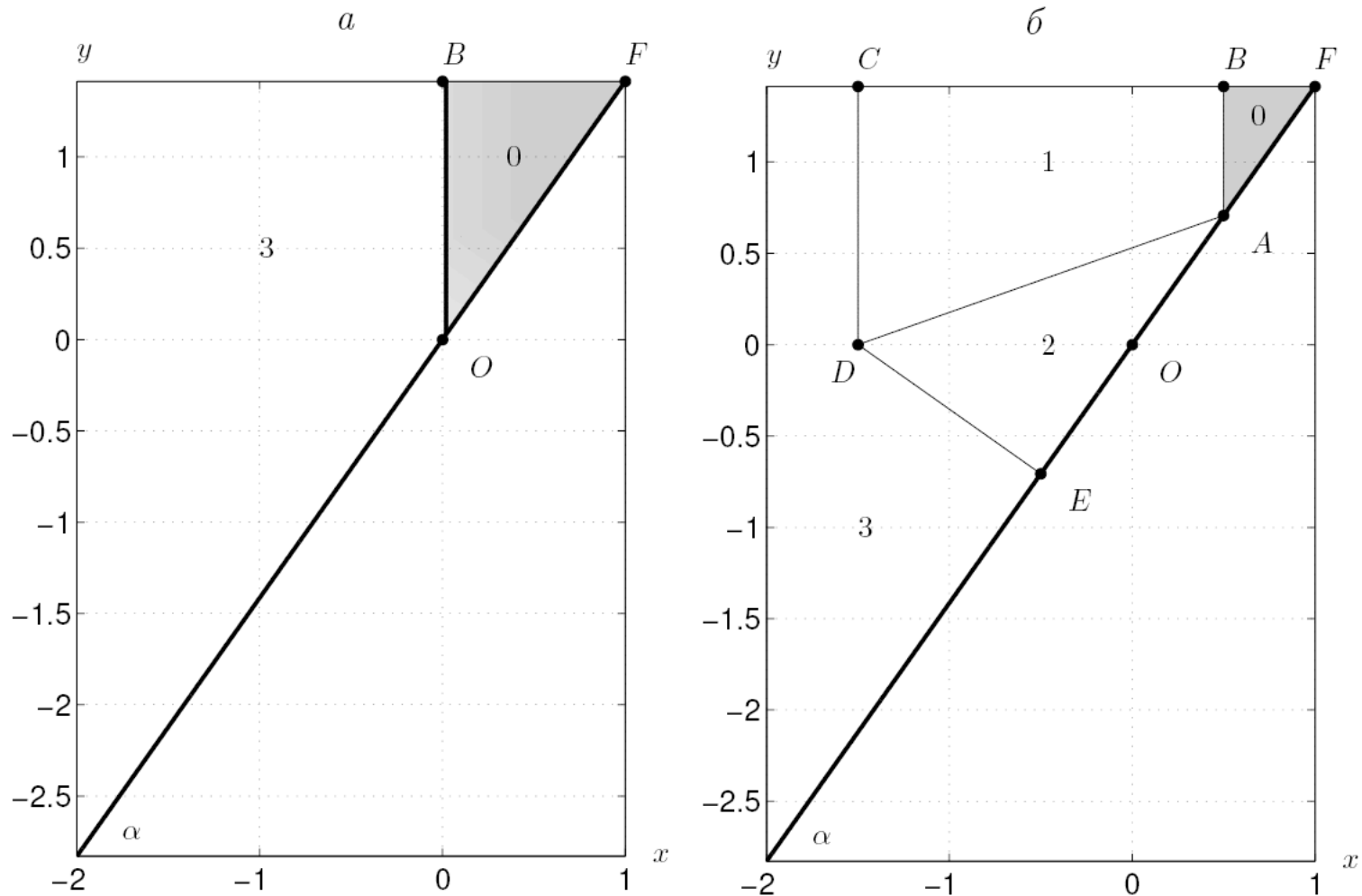
1. Баутин С.П. Мишень для получения термоядерных реакций // Патент РФ 2432627, МПК G21В 1/19(2006.01). Заявка 2010113417/07 от 06.04.2010. Опубликовано 27.10.2011. Бюллетень № 30.



внешние грани вогнуты к центру или к оси симметрии



Начальная конфигурация потока при истечении газа в вакуум с косо́й  
стенки в момент  $t = 0$  (а) и конфигурация потока в момент  $t > 0$  (б)



0 – покоящийся газа; 1 – область течения типа ЦВ;

2 – область течения типа ДВ; 3 – область вакуума

Исходная СУГД, описывающая истечение газа с косої стенки в области двойной волны в переменных  $\xi = x/t$ ,  $\eta = y/t$ , имеет вид

$$\begin{cases} (u - \xi) c_\xi + (v - \eta) c_\eta + \varkappa c (u_\xi + v_\eta) = 0, \\ (u - \xi) u_\xi + (v - \eta) u_\eta + \frac{c}{\varkappa} c_\xi = 0, \\ (u - \xi) v_\xi + (v - \eta) v_\eta + \frac{c}{\varkappa} c_\eta = 0. \\ c|_{AD} = c_0, \quad u|_{AD} = u_0, \quad v|_{AD} = 0, \\ v|_{y=x \operatorname{tg} \alpha} = u \operatorname{tg} \alpha|_{y=x \operatorname{tg} \alpha}, \end{cases} \quad (1)$$

В результате двух невырожденных замен

$$\vartheta = \eta - f(\xi), \quad \xi' = \xi, \quad \text{и} \quad \vartheta' = \vartheta, \quad \zeta = \vartheta + f(\xi) - \xi \operatorname{tg} \alpha, \quad (2)$$

исходная задача (1) приводится к ХЗК стандартного вида для вектора

$$\mathbf{W} = T_2^{-1} \mathbf{U} = \left( c + v \frac{\varkappa}{c_0} (c_0 f' - f), u + v f', -\frac{\varkappa}{c_0} v \right)^T.$$

$$\begin{cases} T_1[B - f'(\xi)A]T_2 \mathbf{W}_\vartheta + T_1[B - \operatorname{tg} \alpha A]T_2 \mathbf{W}_\zeta + T_1[B - \operatorname{tg} \alpha A] \frac{\partial T_2}{\partial \xi} \frac{\mathbf{W}}{f' - \operatorname{tg} \alpha} = 0, \\ \mathbf{W}|_{\vartheta=0} = \mathbf{W}_0, \\ w_3|_{\zeta=0} = -\frac{\varkappa}{c_0} \frac{\operatorname{tg} \alpha}{1 + f'_\xi \operatorname{tg} \alpha} w_2 \Big|_{\zeta=0}. \end{cases} \quad (3)$$

где линия  $\vartheta = 0$  задает звуковую характеристику  $C^+$ . Линия  $\zeta = 0$  задает косої стенку.

**Теорема.** *Поставленная задача (3) при найденной функции  $f(\xi)$  является характеристической задачей Коши стандартного вида и поэтому у нее в некоторой окрестности точки  $(\zeta = 0, \vartheta = 0)$  существует единственное локально-аналитическое решение, представимое в виде сходящегося ряда*

$$\mathbf{W}(\zeta, \vartheta) = \sum_{k=0}^{\infty} \mathbf{W}_k(\zeta) \frac{\vartheta^k}{k!}; \quad \mathbf{W}_k(\zeta) = \left. \frac{\partial^k \mathbf{W}}{\partial \vartheta^k} \right|_{\vartheta=0}. \quad (4)$$

Из следующего условия при  $\vartheta = 0$

$$\det (T_1[B - f'(\xi)A]T_2) \Big|_{\vartheta=0}^{\mathbf{w}=\mathbf{w}_0} \equiv 0, \quad (5)$$

находится выражение для функции  $f(\xi)$  в явном виде:

$$f(\xi) = \begin{cases} \pm c_0 \sqrt{\text{tg}^2 \alpha - 2 \ln c_0}, & \varkappa = 1 (\gamma = 3), \\ \pm c_0 \sqrt{\beta + c_0^{\frac{1-\varkappa}{\varkappa}} (\text{tg}^2 \alpha - \beta)}, & \varkappa \neq 1 (\gamma \neq 3). \end{cases} \quad (6)$$

Далее в соответствии с доказанной теоремой строится решение задачи (3) методом характеристик. Построение первых коэффициентов ряда приводит к транспортному уравнению для  $c_1$ .

Задача Коши для коэффициента  $c_1$  имеет вид:

$$\begin{cases} c_1' - \frac{1}{2c_0} \left[ \frac{c_0^2}{f^2} - 1 - \frac{4}{\varkappa + 1} \frac{c_0^2}{c_0^2 + f^2} \right] c_1 - \frac{\varkappa + 1}{\varkappa} \frac{(c_0^2 + f^2)^2}{4c_0^2 f^3} c_1^2 = 0, \\ c_1|_{\zeta=0} = -\frac{\varkappa}{\varkappa + 1} \cdot \frac{c_0^2 + f^2}{f^2 - c_0^2 - 2c_0 f \operatorname{tg} \alpha} \cdot \frac{2c_0 f \operatorname{tg} \alpha}{2c_0 f + (f^2 - c_0^2) \operatorname{tg} \alpha} \Big|_{\zeta=0}. \end{cases} \quad (7)$$

Далее задача (7) решается для двух случаев:

– согласованный, когда

$$\operatorname{tg}^2 \alpha = \frac{\gamma + 1}{3 - \gamma},$$

– несогласованный при  $\gamma = 5/3$ .

Решение системы (7) в согласованном случае дает решение В. А. Сучкова задачи (1):

$$\begin{aligned} c(t, x, y) &= \frac{1}{\beta} \left( 1 + \varkappa \frac{x}{t} + \varkappa \sqrt{\beta} \frac{y}{t} \right), \quad u(t, x, y) = \left( 1 - \frac{\varkappa}{\beta} \right) \frac{x}{t} - \frac{\varkappa}{\sqrt{\beta}} \frac{y}{t} - \frac{1}{\beta}, \\ v(t, x, y) &= -\frac{\varkappa}{\sqrt{\beta}} \frac{x}{t} + (1 - \varkappa) \frac{y}{t} - \frac{1}{\sqrt{\beta}}. \end{aligned} \quad (8)$$

При  $\gamma = 5/3$  решение (7) можно построить в явном виде:

$$c_1(\xi) = \frac{3 + c_0^2 (\operatorname{tg}^2 \alpha - 2)}{\sqrt{2 + c_0^2 (\operatorname{tg}^2 \alpha - 2)}} \cdot \frac{1}{M(\xi)|_{\varkappa=1/3}}, \quad (9)$$

Выражение  $M(\xi)|_{\varkappa=1/3}$  равно

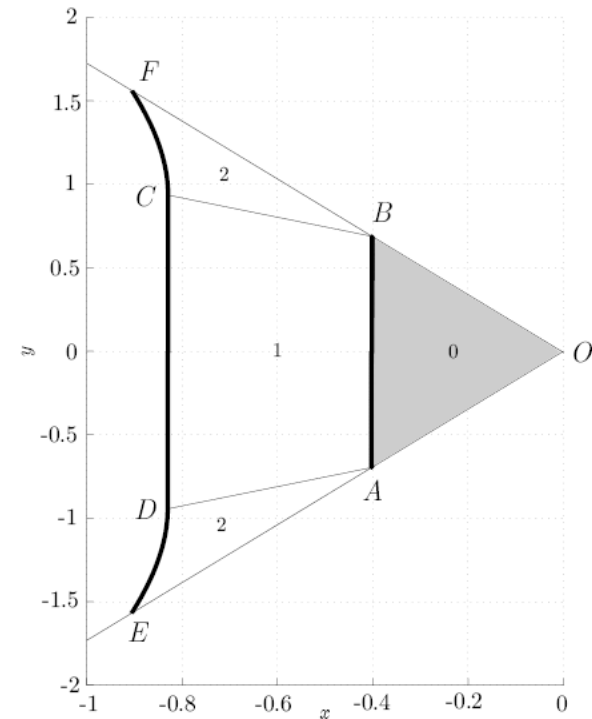
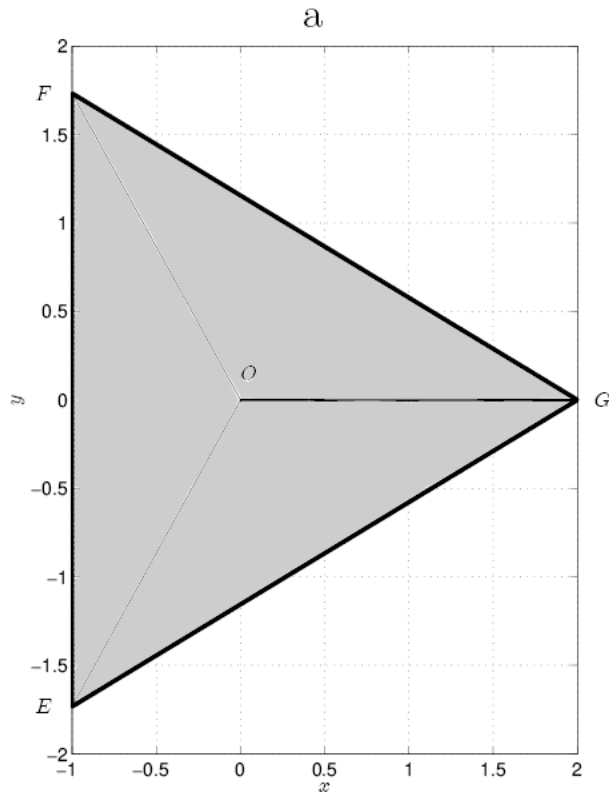
$$\begin{aligned}
 M(\xi)|_{\varkappa=1/3} = & -6c_0^3 + 2,25c_0^3 \operatorname{tg}^2 \alpha + \frac{3c_0^3}{\operatorname{tg}^2 \alpha} + 9\frac{1}{2} - \frac{1}{4}c_0^2 (\operatorname{tg}^2 \alpha - 2) + \\
 & + \frac{17\sqrt{2}}{8}c_0^3 (\operatorname{tg}^2 \alpha - 2)^{3/2} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{1}{2}(\operatorname{tg}^2 \alpha - 2)} - \frac{1}{2 + c_0^2 (\operatorname{tg}^2 \alpha - 2)} - \\
 & - \frac{17\sqrt{2}}{8}c_0^3 (\operatorname{tg}^2 \alpha - 2)^{3/2} \operatorname{arctg} \frac{c_0}{\sqrt{2/(\operatorname{tg}^2 \alpha - 2)}}.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Применим полученное решение к описанию сжатия специального призматического объема, представляющего собой правильный треугольник, тогда  $\alpha = \pi/3$ ,  $\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{3}$ , и решение (10) имеет вид:

$$c_1(\xi) = \frac{3 + c_0^2}{\sqrt{2 + c_0^2}} \times \left[ 9.5 + 3.5996c_0^3 - 0.25c_0^2 - \frac{1}{c_0^2 + 2} - \frac{17\sqrt{2}}{8}c_0^3 \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{2}}{2}c_0 \right]^{-1}. \tag{11}$$

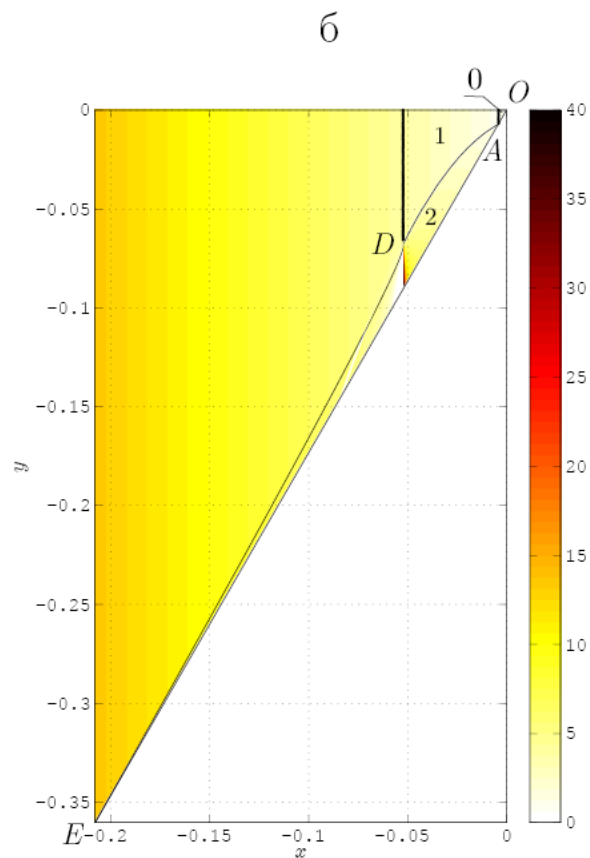
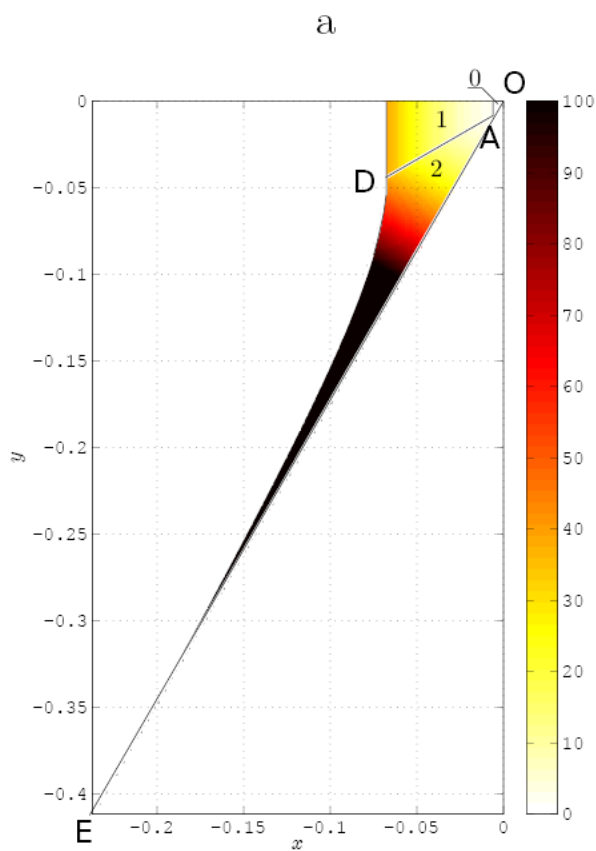
Решение (11) при  $c_0^* = 3.9564$  ( $\xi_* = 12.8257$ ) имеет особенность. Значение функции  $c_1 \rightarrow \infty$  при  $c_0 \rightarrow c_0^*$ . Так как  $c_1 = \frac{\partial c}{\partial \vartheta}|_{\vartheta=0}$ , следовательно, в точке  $\xi_*$  при сжатии призматического объема возникает градиентная катастрофа, что приводит к образованию сильного разрыва в самом течении, и как следствие формированию ударной волны сжатия.

Начальная конфигурация замкнутого призматического объема при  $\alpha = \pi/3$  в момент  $t_0 < 0$  (а) и конфигурация потока в замкнутом призматическом объеме при  $\alpha = \pi/3$  в момент  $t_0 < t < 0$  (б)



0 – область, в которой находится покоящийся газ; 1 – область течения в виде ЦВ;  
2 – область течения в виде ДВ

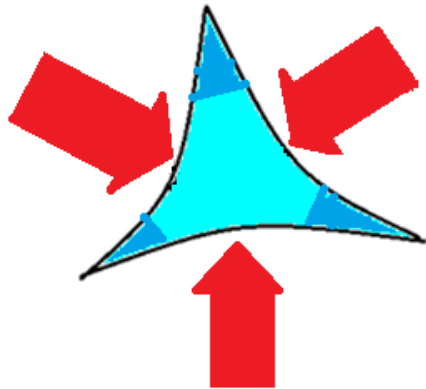
# Значения функции $s$ при приближении к точке $\xi_*$



0 – область, в которой находится покоящийся газ; 1 – область течения в виде ЦВ;  
2 – область течения в виде ДВ

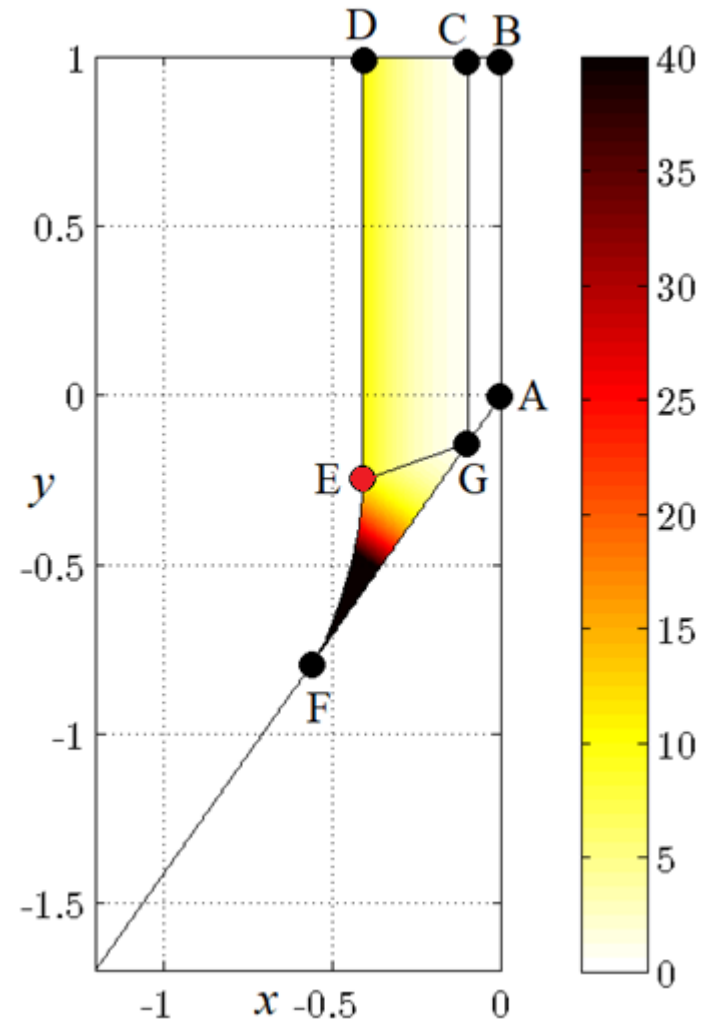


Специфика таких течений:  
большое увеличение давления в угловых областях!



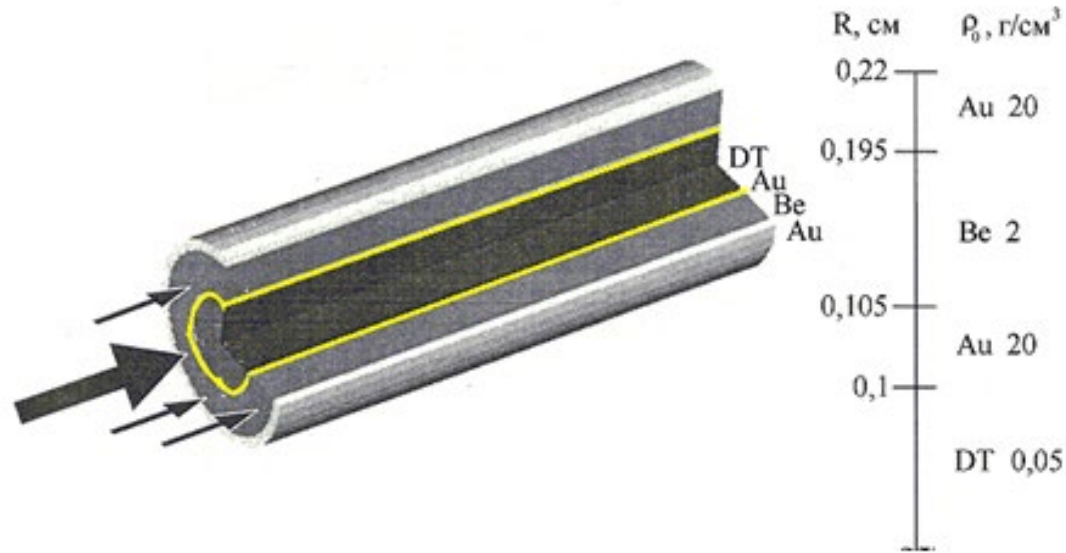
Качественное поведение течения  
в треугольной мишени.

В «несогласованном случае»  
в точке  $E$  и в ее окрестности  
в области двойной волны еще  
до момента сильного сжатия  
возникает бесконечный градиент,  
ведущий к возникновению УВ.



Численный расчет течения  
в угловой области

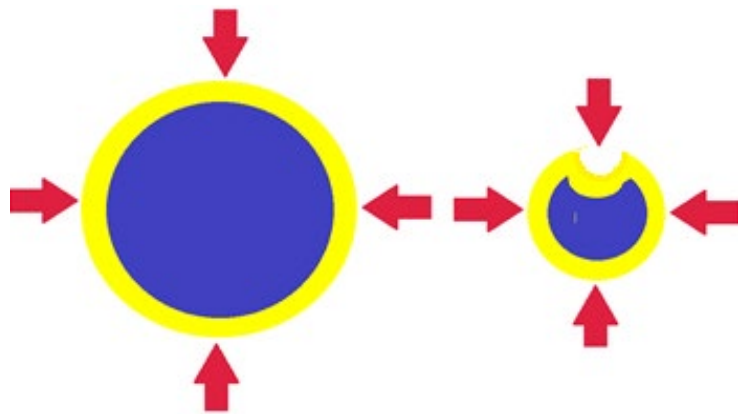
## Рекомендация по внешней оболочке мишени



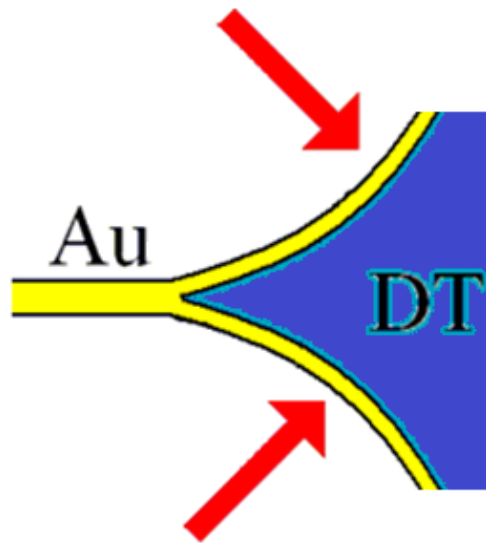
Мишень, предложенная в работе:

Долголева Г.В., Забродин А.В. Кумуляция энергии в слоистых системах и реализация безударного сжатия. Наука: 2004.

Наличие внешней золотой оболочки мишени выступает в роли некоторого «бампера» («общей рессоры»), делающего более однородным внешнее воздействие на мишень.



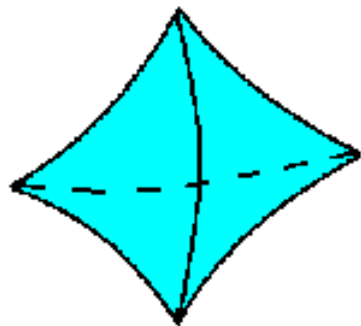
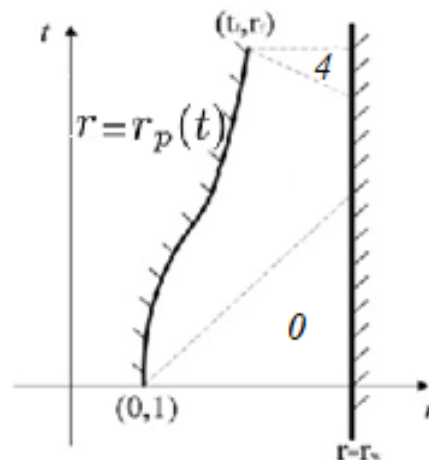
При этой шаровой или цилиндрической конфигурации мишени радиус сжимающей поверхности уменьшается, но все та же масса оболочки входит во все меньший объем. И это существенно изменяет течение сжатия.



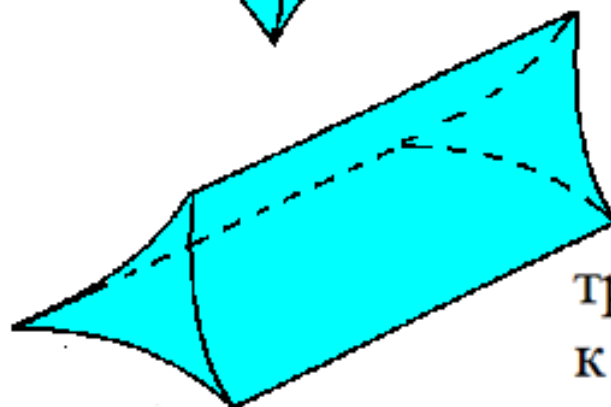
При данной конфигурации мишени радиус сжимающей поверхности не уменьшается и «лишняя» масса оболочки не изменяет общего характера течение сжатия.

## 2) "сжатие изнутри":

$$t \rightarrow t_* \Rightarrow r_p(t) \nrightarrow 0$$



не шар, а тетраэдр с вогнутыми  
к центру гранями



треугольная призма с вогнутыми  
к оси гранями

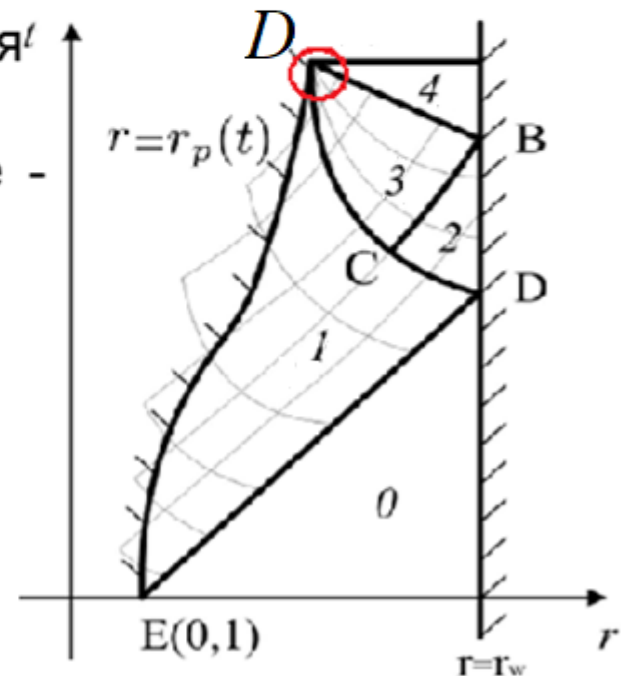
Баутин С.П. Мишень для получения термоядерных реакций  
// Патент РФ 2432627, МПК G21В 1/19(2006.01). – Заяв-  
ка 2010113417/07 от 06.04.2010. – Опубликовано 27.10.2011  
Бюллетень № 30.

# Сжатие из покоя в покой

В момент времени  $t = 0$  газ покоится и однороден с плотностью  $\rho = 1$ .  
В финальный момент времени  $t_*$  газ снова покоится и его плотность равна заданному значению  $\rho_* > 1$ .

Требуется найти безударное течение газа, возникающее под действием двух поршней, один из которых неподвижен.

- особенность в финальный момент сжатия на сжимающем поршне;
- вкладываемой энергии тратится меньше - только на сжатие, но не разгона газа;
- время сжатия больше;
- в области 4 происходит самоторможение газа.



Для конфигурации «сжатие из покоя в покой» доказана теорема о существовании и единственности решения задачи о получении наперед заданного распределения.

Строго раскрыта особенность в точке  $D$ .

Это позволило методом характеристик провести счет в обратном направлении изменения времени.

Проведены расчеты:

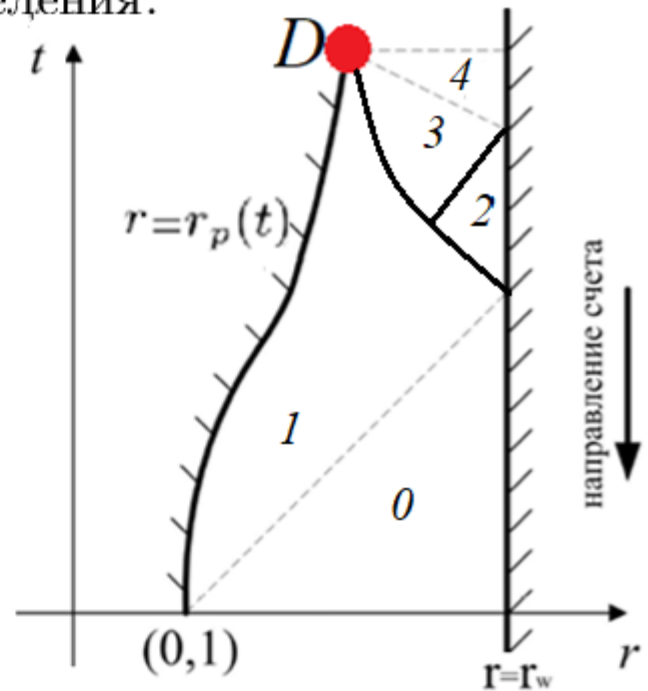
$$\nu = 0, 1, 2;$$

$$\gamma = 1.4, 5/3;$$

$$\rho_* = 32, 10^3, 10^4;$$

массы газа  $m = 1, 10, 100$ .

В результате в табличном виде найдена траектория сжимающего поршня  $r = r_p(t)$ .



Баутин С.П. Математическое моделирование сильного сжатия газа. Наука, 2007.

Баутин С.П., Николаев Ю.В. Численное решение задачи о сжатии газа из покоя в покой // Вычислительные технологии. 2020. Т.25, № 5.

Баутин С.П., Николаев Ю.В. Численное решение задачи о сжатии газа при заданном законе воздействия // Вычислительные технологии. 2021.Т.26, № 6.

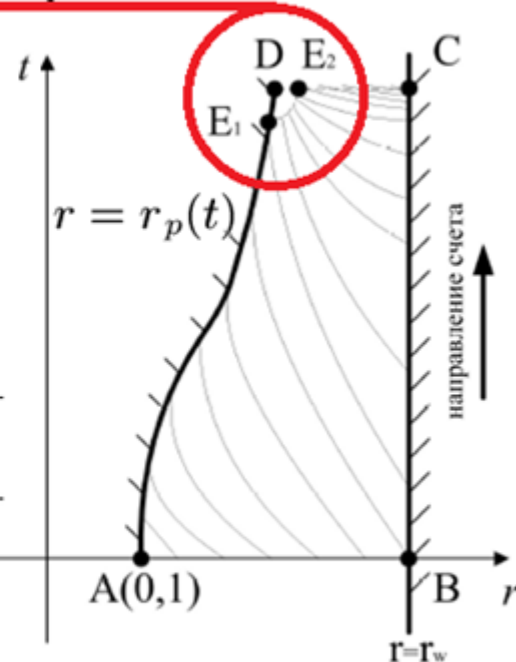
# Счет в прямом направлении изменения времени

С целью проверки полученного закона сжатия  $r = r_p(t)$

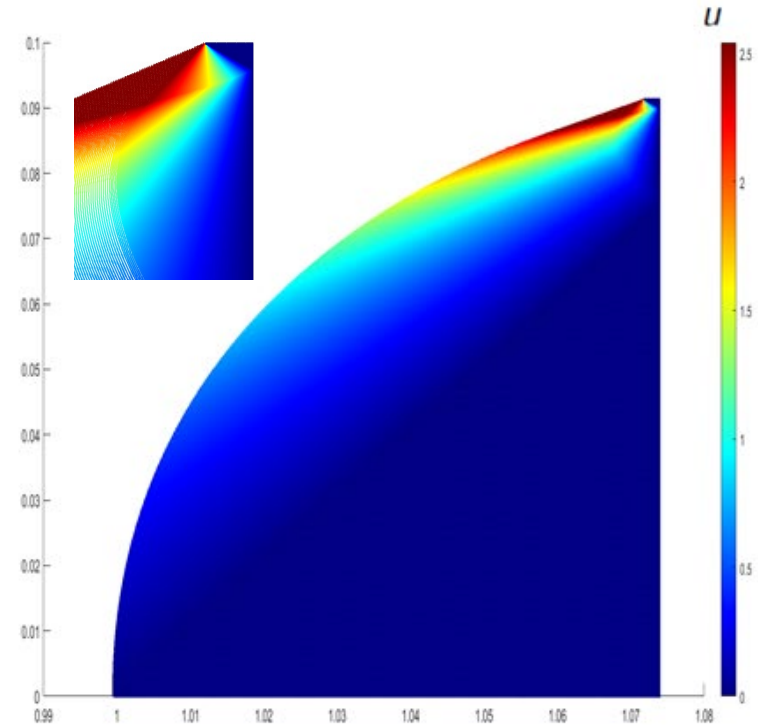
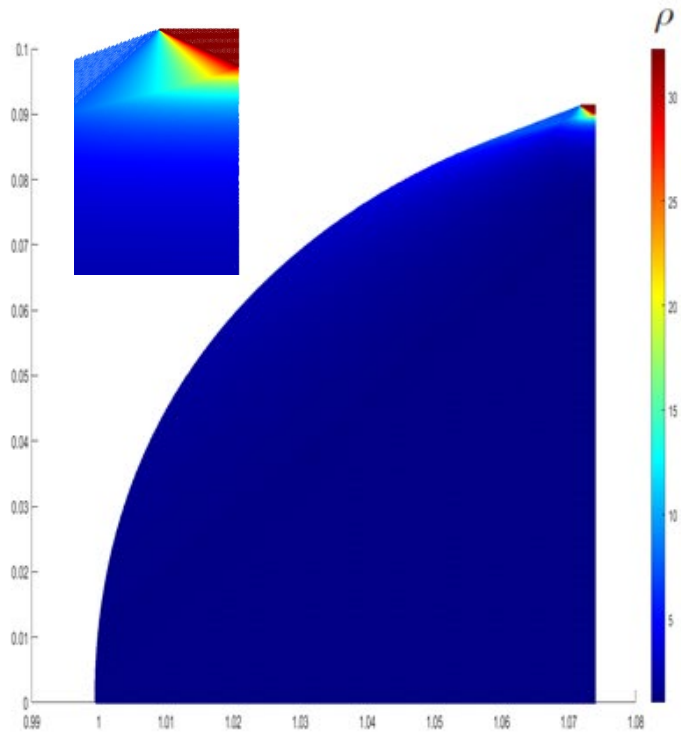
Результаты расчетов вне окрестности точки  $D$ ,  
где сетка строилась регулярно.

В том числе:  $T_{reg}$  – длительность сжатия;  
 $D_{reg}$  – ширина сжатого слоя.

Номер варианта	Значение $t$ в точке $E_1$	Значение $r$ в точке $E_1$	Значение $r$ в точке $E_2$	$T_{reg}, \%$	$D_{reg}, \%$
1	10.695031	10.998992	10.999007	99.999989	99.253752
2	1.101420	2.045185	2.045185	99.999998	99.678271
3	0.530684	1.501788	1.501789	99.999986	98.380810
4	10.300544	10.998956	10.999011	99.999986	98.851126
5	1.069220	2.045185	2.045186	99.999998	98.789879
6	0.515905	1.501788	1.501789	99.999998	98.801335



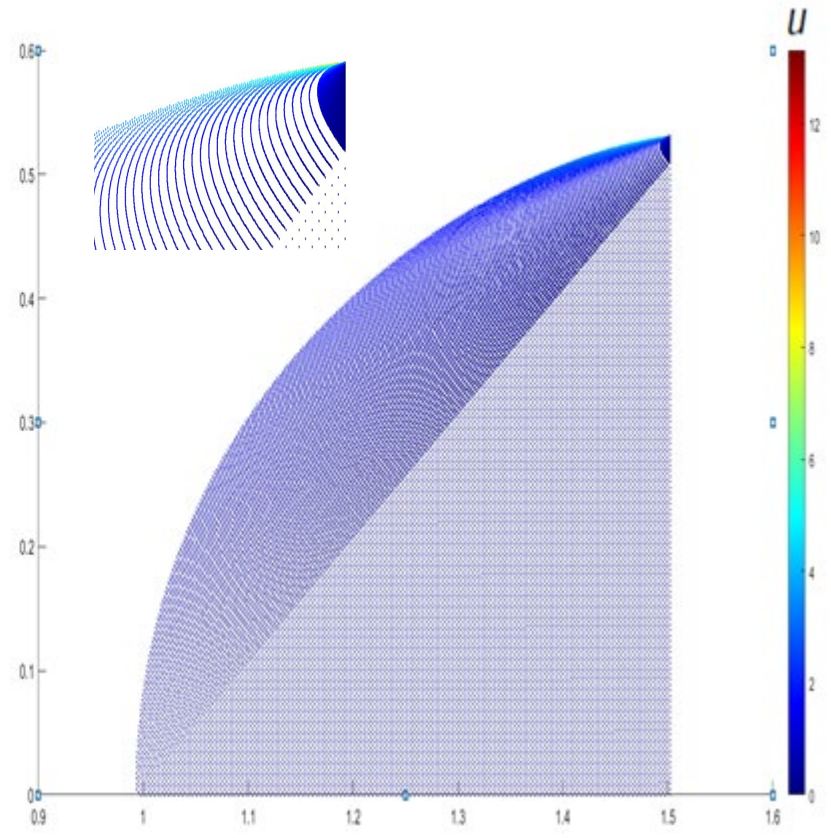
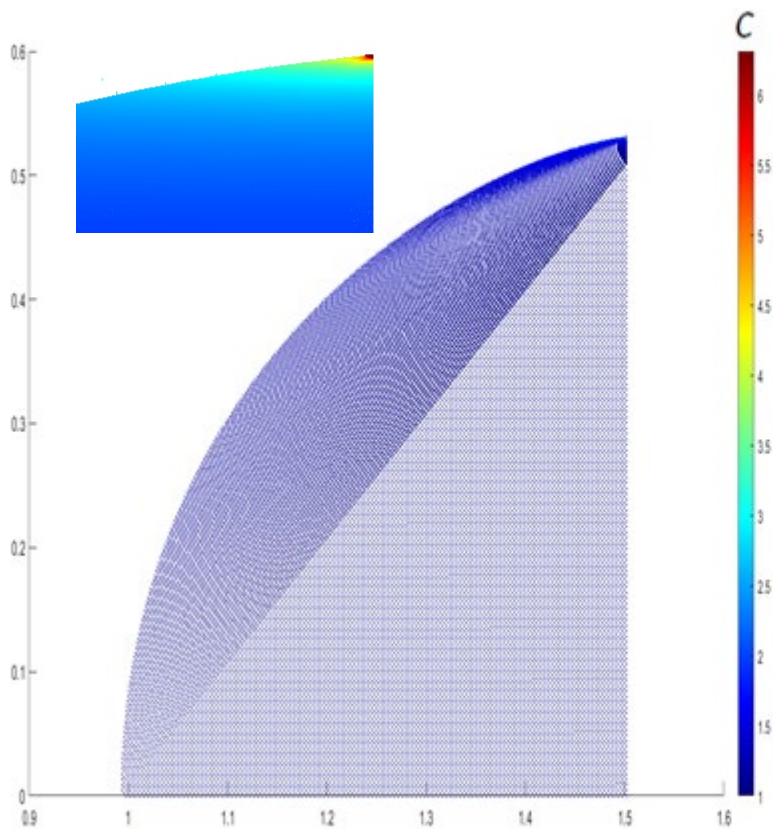
$\gamma = 1.4$ ,  $m = 1$ ,  $\nu = 2$ , сжатие в 32 раза



В момент сильного сжатия  $t = t_*$  газ между сжимающим поршнем и неподвижной стенкой однородный и покоящийся.



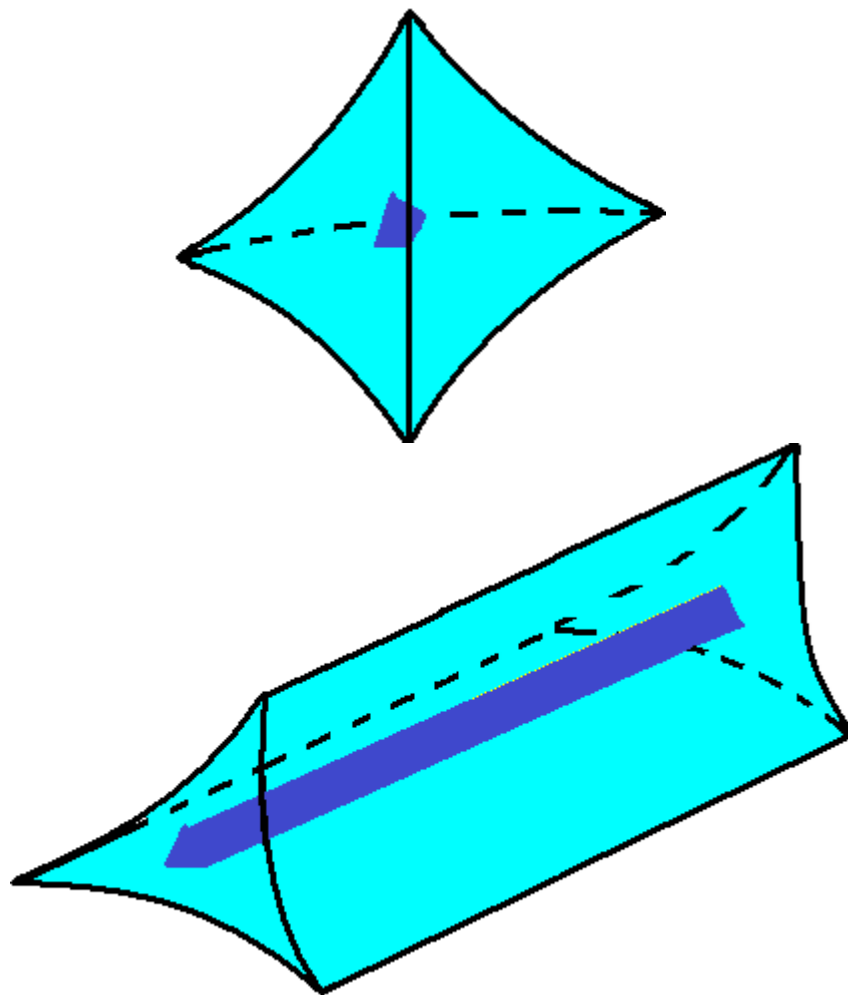
$\gamma = 1.4, m = 1, \nu = 2$ , сжатие в  $10^4$  раз



В момент сильного сжатия  $t = t_*$  газ между сжимающим поршнем и неподвижной стенкой однородный и покоящийся.

Главный эффект от сжатия «из покоя в покой» –  
повышение плотности при отражении потока от жесткой стенки

– можно получить, поместив в центр мишени  
твердый сердечник соответствующих размеров.



## Заключение

В заключении еще раз перечислим предложенные рекомендации по мишеням для ЛТС:

- контейнер для мишени делать сферическим;
- увеличить на капсуле число мест вхождения лазерных лучей;
- в качестве мишени брать не шар, а тетраэдр,  
внешние грани должны быть вогнутыми к центру мишени;
- в геометрический центр мишени помещать твердый сердечник,  
повторяющий общую геометрию мишени;
- возможно покрывать мишень слоем золота.

Авторы с благодарностью вспоминают участие  
профессора Долголевой Галины Владимировны  
в обсуждениях возможных конфигураций  
мишеней.

**Спасибо за внимание !**

[spbautin@mail.ru](mailto:spbautin@mail.ru)

[ynikolaev@list.ru](mailto:ynikolaev@list.ru)

[epnk@rambler.ru](mailto:epnk@rambler.ru)