

**ДЖОУЛЕВ НАГРЕВ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ,
ФОРМИРУЕМОЙ ПРИ СХЛОПЫВАНИИ
КОНИЧЕСКОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБЛИЦОВКИ В
МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

С.В. Станкевич

***Институт гидродинамики
им. М.А. Лаврентьева СО РАН***

Новосибирский государственный технический университет,

***г. Новосибирск
2023 год***

Представлены результаты численного моделирования кумуляции магнитного поля и джоулева нагрева кумулятивных струй, возникающих при взрывном обжати металлического конуса с предварительно созданным в нем магнитным полем.

Расчеты проводились в два этапа

На первом, проводился расчет кинематики движения частиц схлопывающейся КО и формирования кумулятивной струи.

На втором, для полученной кинематики движения частиц проводился расчет кумуляции магнитного поля и нагрева кумулятивной струи на основе решения нестационарных уравнений Максвелла в двумерной постановке.

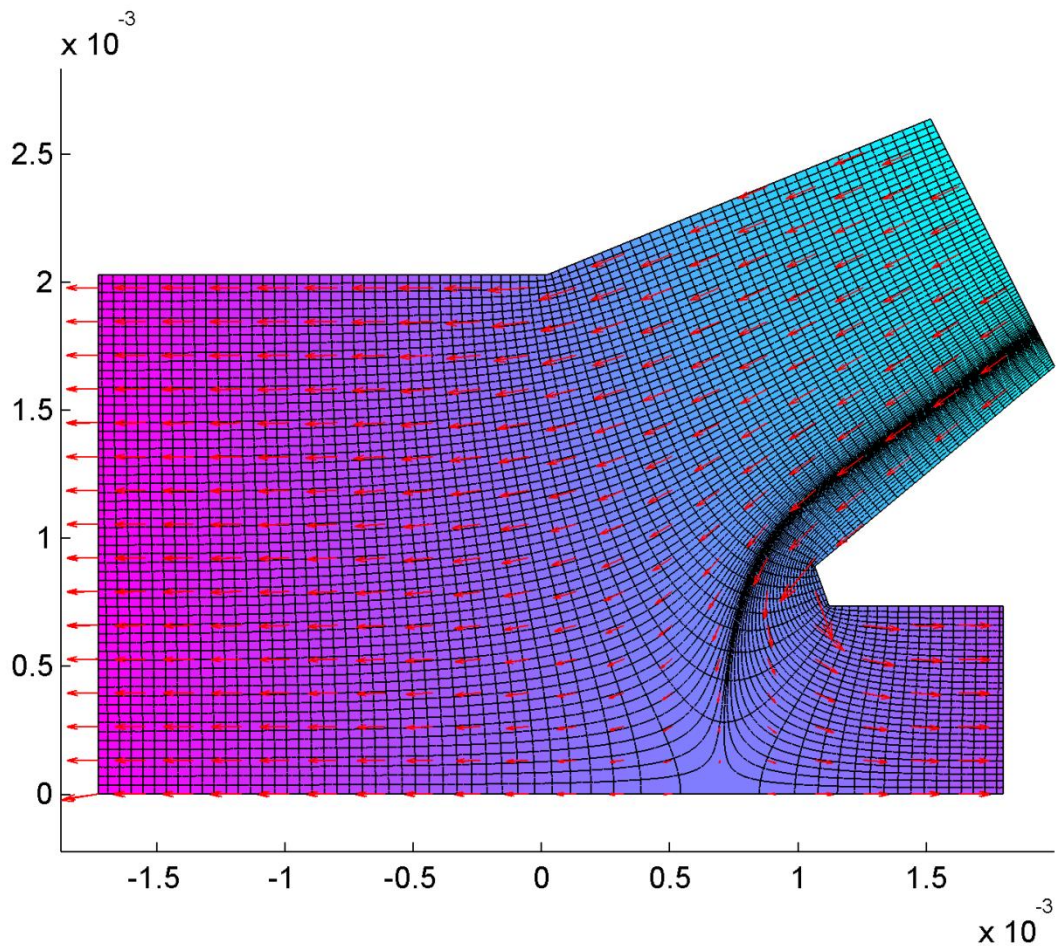
В отличие от **известных** работ [Федоров 2000, 2016], учитывалась конечная электропроводность материала конуса.

Исследовалось влияние на параметры струи **различных** способов создания начального магнитного поля в конусе с помощью одного или двух соленоидов, а также постоянных магнитов.

Для расчета кинематики движения кумулятивной облицовки (КО) были сделаны предположения

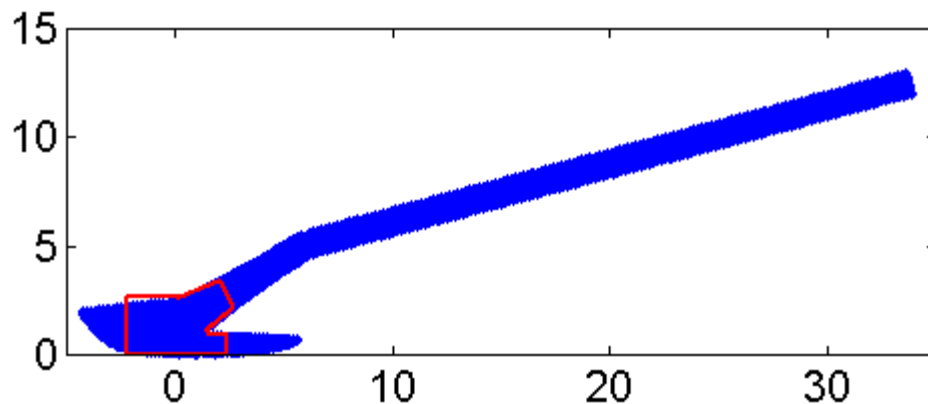
1. Скорость движения всех точек внутренней границы облицовки определяется начальным отношением линейной массы взрывчатого вещества (ВВ) окружающем КО к ее линейной массе.
2. Угол схлопывания выбирался постоянным, что достигалось подбором распределения массы ВВ по длине облицовки.
3. В области формирования кумулятивной струи кинематика движения элементов (КО) определяется по формулам гидродинамической теории кумуляции для несжимаемой жидкости.
4. Область кумуляции имеет неизменную геометрию, однако размер этой области изменяется в процессе схлопывания КО на каждом шаге по времени в соответствии с изменением толщины сжимаемого продуктами детонации конуса

Распределение скоростей и линии тока в области кумуляции

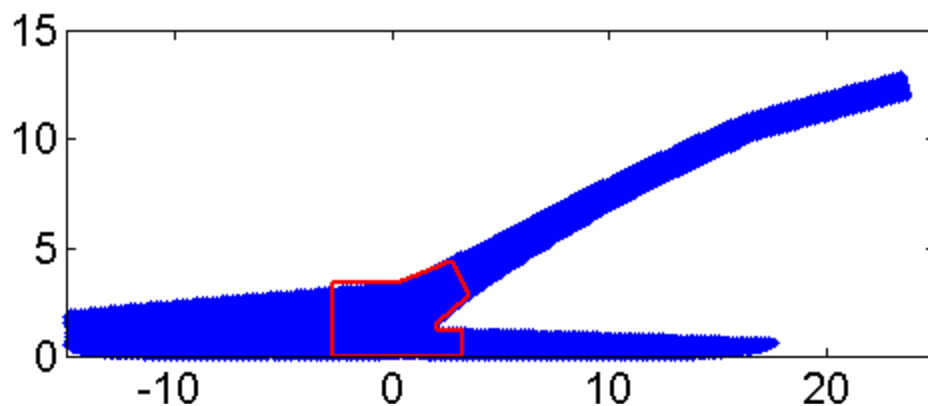


$$\mathbf{v} = \nabla \times \mathbf{F}, \quad \nabla \times \mathbf{v} = 0, \quad \frac{\partial}{\partial r} \frac{1}{r} \frac{\partial r F_\theta}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{r} \frac{\partial r F_\theta}{\partial z} = 0$$

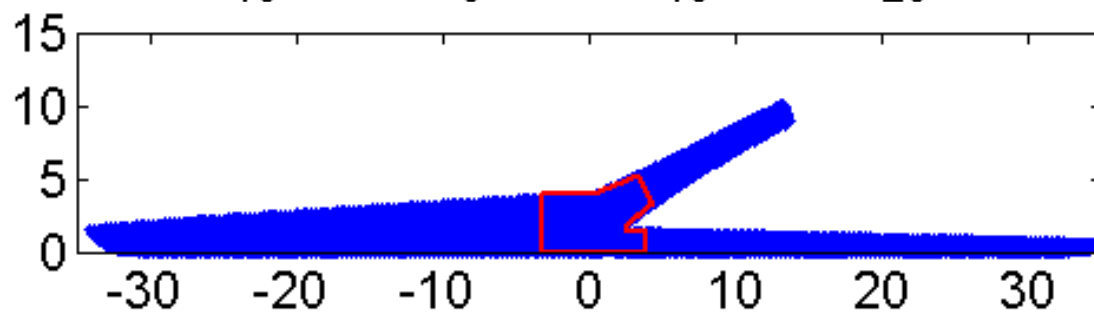
Результаты расчетов конфигураций движения КО для
нескольких моментов времени



$t = 2 \mu s$



$t = 4.8 \mu s$



$t = 8.9 \mu s$

Z, mm

Методика нестационарного расчета магнитных полей и токов

Для функции потока ψ

$$\psi(r, z, t) = \int_0^r B_z(r, z, t) r dr.$$

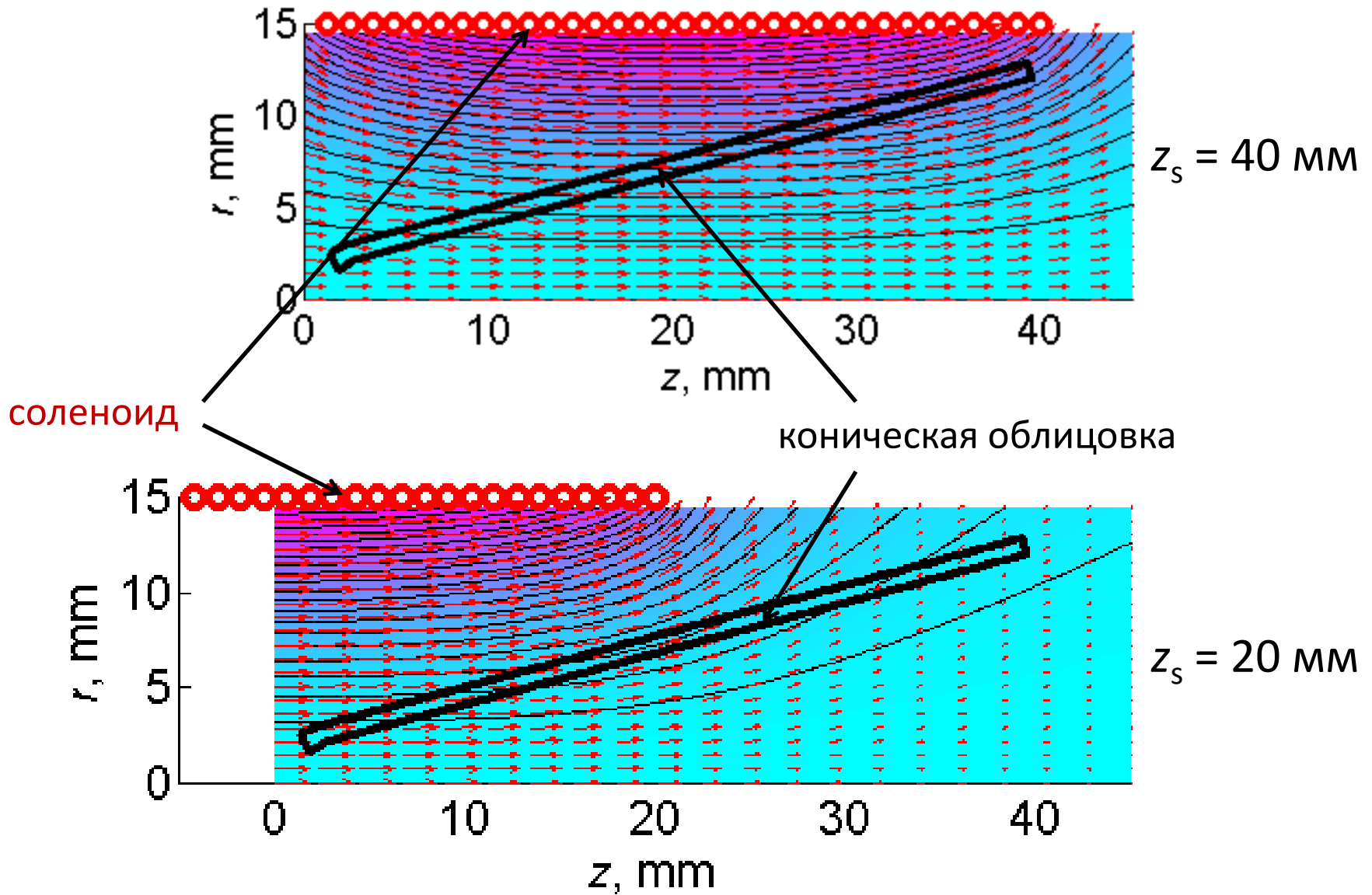
Полагая $\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$, $\mu_0 = \text{const}$ и пренебрегая токами смещения в КО

$$\frac{\mu_0 \sigma}{r} \frac{d\psi}{dt} = \nabla \cdot \frac{1}{r} \nabla \psi, \quad j_\theta = \frac{1}{\mu_0} \nabla \cdot \left(\frac{1}{r} \nabla \psi \right), \quad \Delta T = \int_0^t \frac{j_\theta^2}{\sigma(T)} dt.$$

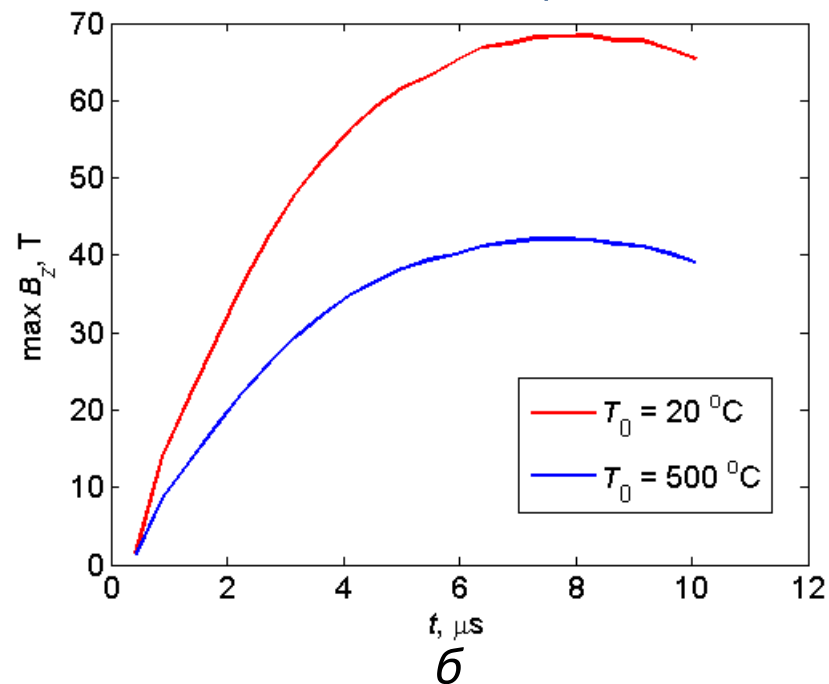
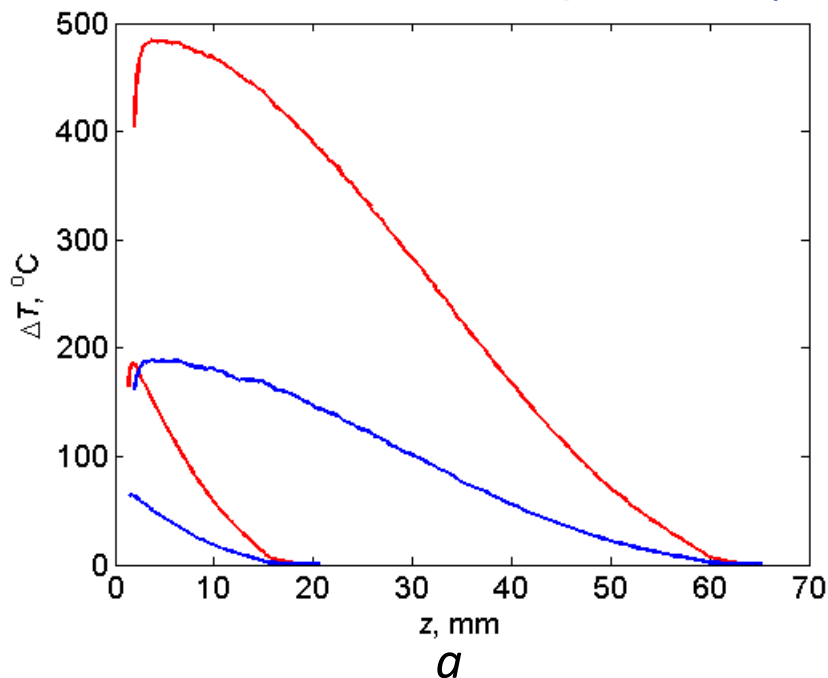
Для расчета потока в КО использовался метод конечных элементов.

Для учета магнитного потока вне проводников ($\sigma = 0$ и $j_\vartheta = 0$) использовался метод граничных элементов который позволяет найти выражение для производных функции потока через ее значения на границах кумулятивной облицовки.

Вариант 1. Начальное распределение магнитного потока и магнитного поля создаваемых соленоидом



Вариант 1 (соленоид без смещения).

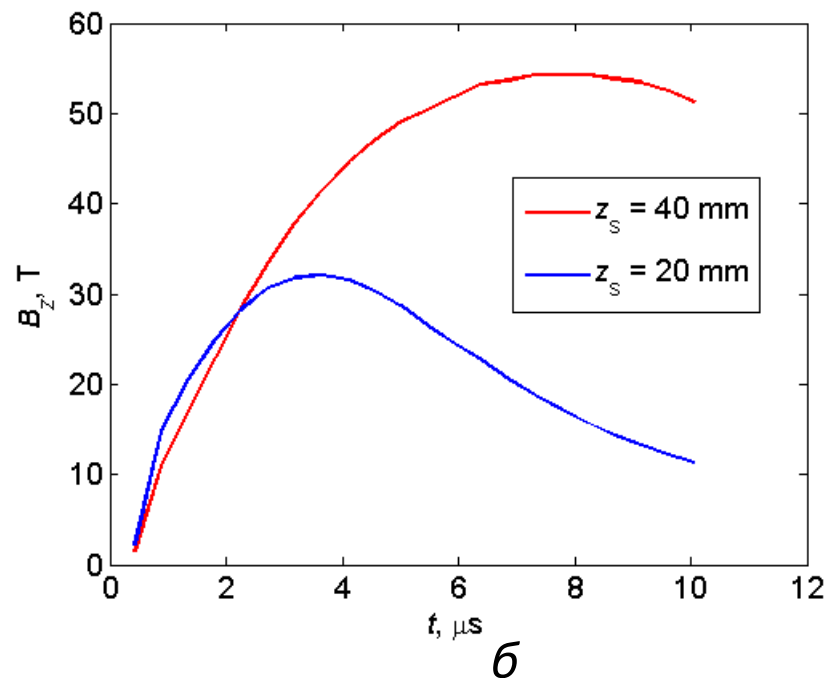
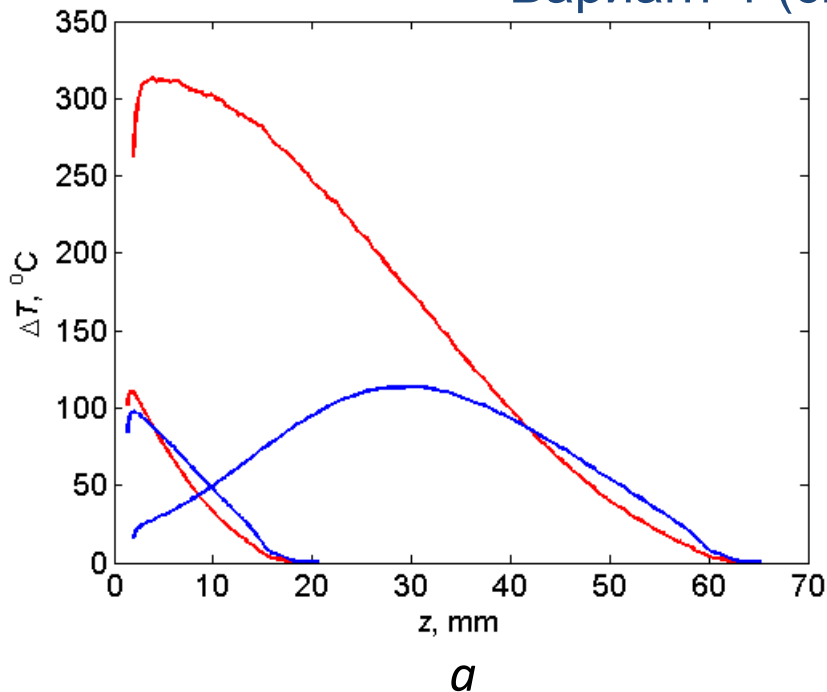


а) Распределение температуры на оси КС для моментов времени 2,4 мкс и 9,3 мкс, полученные для значений начальной температуры медной конической облицовки 20, и 500 $^\circ\text{C}$.

б) Изменение максимальной магнитной индукции в КО от времени

Длина соленоида $L_s = 40$ мм, внутренний радиус – $R_s = 13$ мм, полный ток $I_s = 4$ кА. Основание конуса – 13 мм, высота – 40 мм, толщина 1 мм, угол при вершине 30 градусов, $B_0 = 0,1$ Тл.

Вариант 1 (смещенный соленоид).



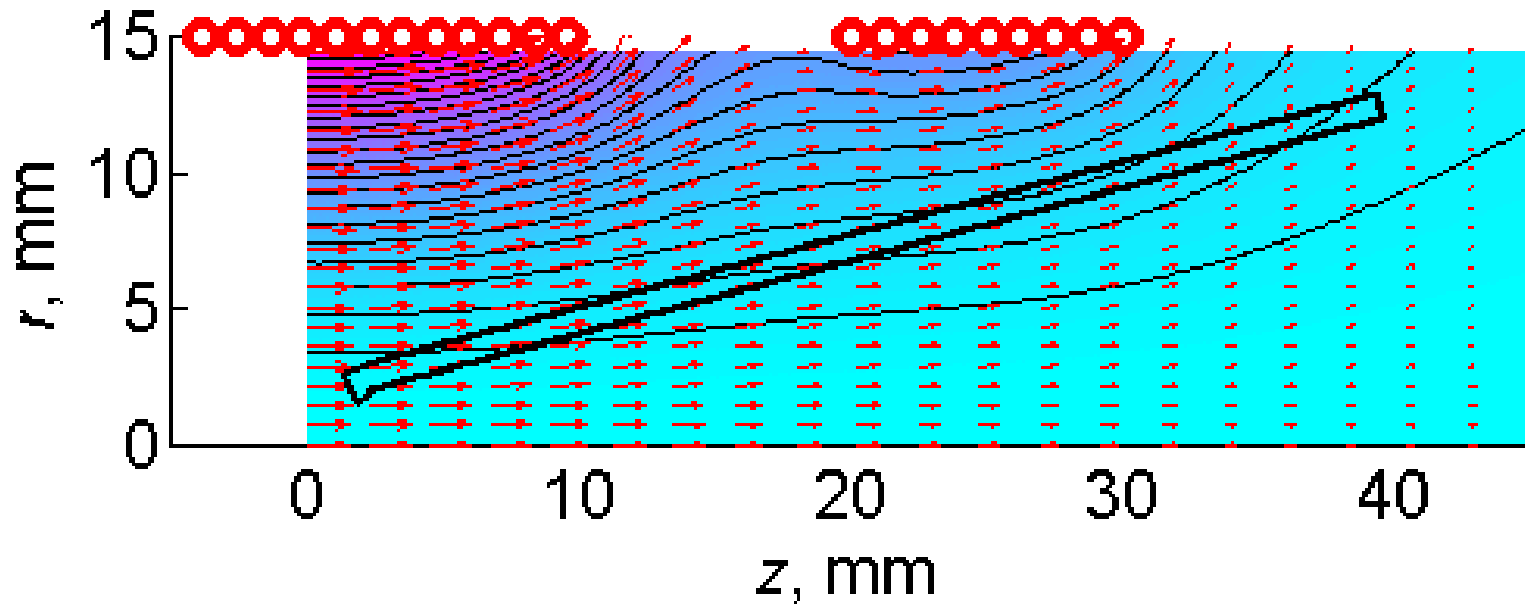
а) Распределение температуры и магнитной индукции на оси ($r = 0$) кумулятивной струи для моментов времени 2,4 мкс, 9,3 мкс, при различных положениях соленоида.

б) Изменение максимальной магнитной индукции в КС от времени. Начальная температура КО определялась выражением

$$T_0(r) = 300 \exp(-r / R_0) + 200.$$

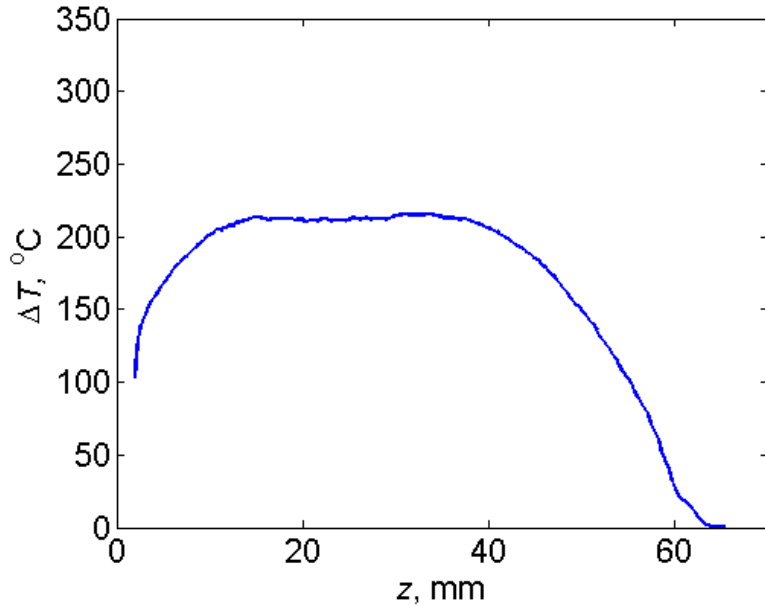
Смещение области максимального нагрева кумулятивной струи к ее головной части.

Вариант 2. Распределение магнитного потока и магнитного поля создаваемых парой соленоидов.

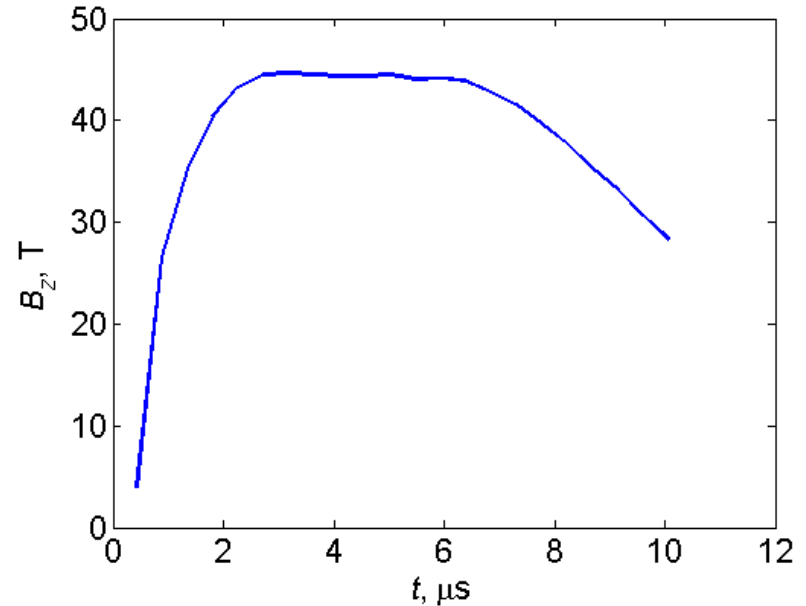


$$\max B_0|_{r=0} = 0,17 \text{ T}$$

Вариант 2 (два соленоида).



a

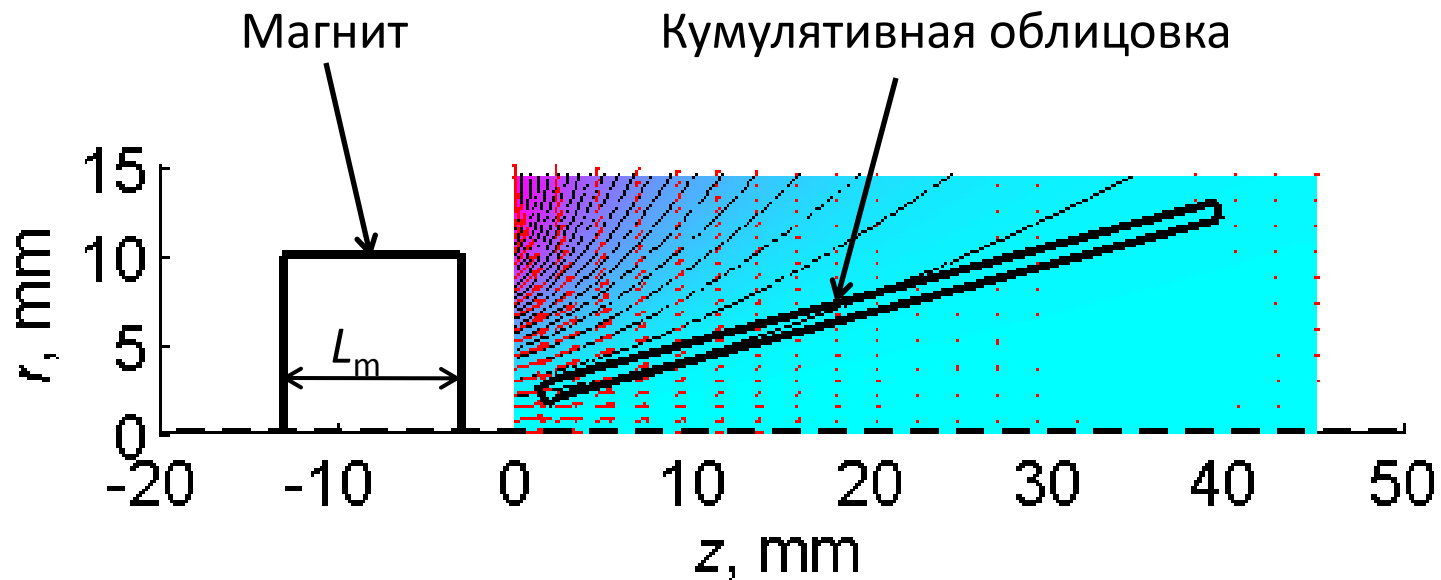


б

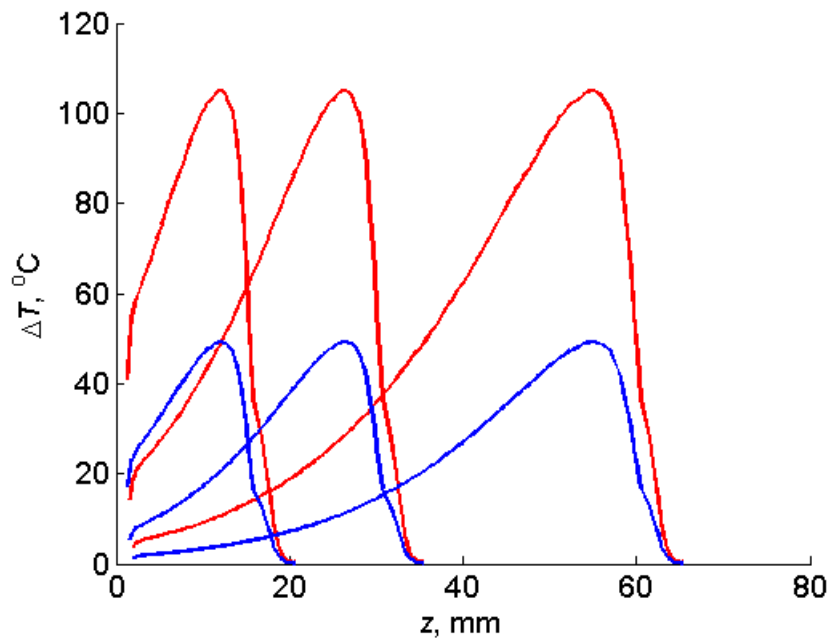
- a) Распределение температуры и магнитной индукции на оси кумулятивной струи для момента времени 9,3 мкс.
- б) Изменение максимальной магнитной индукции в КС от времени

Длина первого соленоида 20 мм, ток 4,8 кА, второго 10 мм, ток 1 кА. Максимальное начальное магнитное поле на оси КО 0,17 Тл.

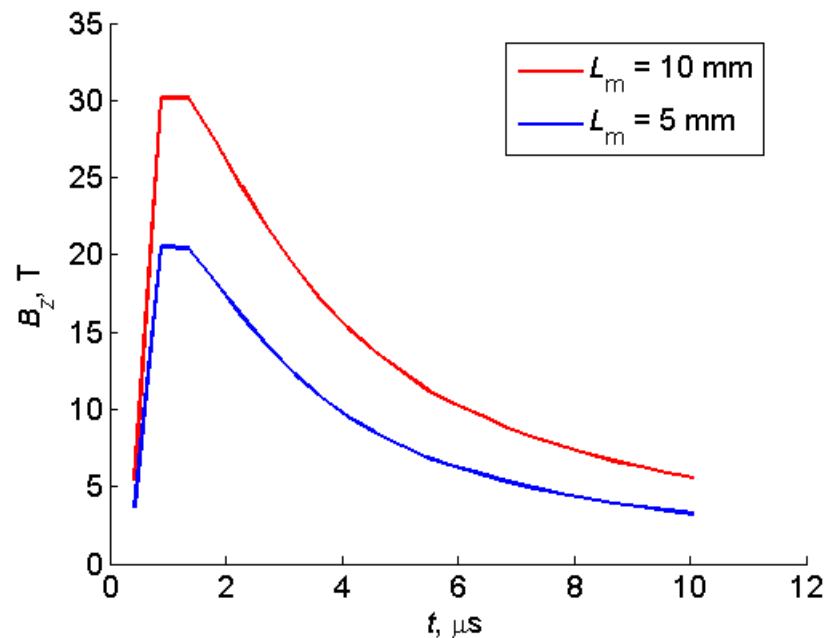
Вариант 3 . Начальное распределение магнитного потока и магнитного поля создаваемых постоянным магнитом.



Вариант 3. (постоянный магнит)



a



б

- а) Распределение температуры и магнитной индукции на оси КС для моментов времени 2,4 мкс, 4,7 мкс, 9,3 мкс ,
- б) Изменение максимальной магнитной индукции в КС от времени
- Синие кривые длина магнита 5 мм, красные - 10 мм.
- Максимальное начальное магнитное поле на оси КО 0,17 Тл и 0,24 Тл соответственно

Выводы

- предварительное создание магнитного поля в кумулятивной облицовке приводит к значительному его усилению (более чем в 300 раз),
- при относительно небольшой интенсивности начального магнитного поля на оси КО ($\sim 0,1$ Тл) увеличение температуры области вблизи оси кумулятивной струи может составлять 200-300°K, при этом *возможно термическое разупрочнение материала КС, увеличение ее предельного удлинения и, следовательно, пробивной способности.*
- нагрев оказывается неравномерным по сечению и длине струи,-при этом радиус этой области оказывается довольно мал (менее 1 мм),
- используя различные способы создания начального магнитного потока в КО (с помощью одного или двух соленоидов, а также постоянных магнитов) *можно управлять распределением температуры вдоль кумулятивной струи.*

СПАСИБО!