



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 192 за 2018 г.



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

Ольховская О.Г.

Моделирование сжатия Z-
пинчей на основе
двухкаскадных проволочных
сборок

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Ольховская О.Г. Моделирование сжатия Z-пинчей на основе двухкаскадных проволочных сборок // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. № 192. 23 с. doi:[10.20948/prepr-2018-192](https://doi.org/10.20948/prepr-2018-192)
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2018-192>

**Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук**

О. Г. Ольховская

**Моделирование сжатия Z-пинчей
на основе двухкаскадных
проволочныхборок**

Москва — 2018

Ольховская О. Г.

Моделирование сжатия Z-пинчей на основе двухкаскадных проволочныхборок

С помощью РМГД кода MARPLE-3D (разработка ИПМ им. М. В. Келдыша РАН) выполнена серия вычислительных экспериментов по трехмерному моделированию сжатия многопроволочных вложенныхборок. Испарение плазмы моделировалось посредством уточненной модели длительного плазмообразования с разрешением отдельных проволок в составе сборки. Результаты моделирования сопоставляются с данными, полученными на установке Ангара-5-1 (ГНЦ РФ ТРИНИТИ). Продемонстрировано качественное и количественное согласие результатов расчетов с экспериментальными данными и теоретическими оценками. Двукаскадная конструкция сборки позволяет добиться устойчивого компактного сжатия. Между каскадами формируется ударная волна, которая гасит неоднородности плазменных струй. Эффект наблюдается и том случае, когда внешний и внутренний каскады изготовлены из одного материала. Уменьшение отставшей массы более выражено в случае квазисферической сборки.

Ключевые слова: магнитная гидродинамика, Z-пинч, многопроволочные вложенныеборок

Olga Gourgenovna Olkhovskaya

Simulations of nested wire arrays Z-pinch implosion

Implosion of multiwire nested arrays is simulated in a series of numerical experiments with 3D models carried out by means of RMHD code MARPLE-3D (Keldysh Institute of Applied Mathematics). Plasma emission is reproduced via prolonged plasma ablation model, the distinction of wires in nested arrays is implemented. The numerical results are compared with the experimental data obtained at Angara-5-1 facility (TRINITY, Troitsk). The qualitative and quantitative agreement of the simulation results with experimental data and theoretical estimates is shown. Two-cascade nested array design allows a stable compact compression. Between the cascades a shock wave is formed, which damps the inhomogeneities of the plasma jets. The effect is also observed when the external and internal cascades are of the same material. The decrease in the trailing mass is more significant in the case of a quasi-spherical array.

Key words: magnetohydrodynamics, Z-pinch, nested wire arrays

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова и вычислительных ресурсов Межведомственного суперкомпьютерного центра Российской академии наук (МСЦ РАН).

1 Введение

В течение ряда лет в ГНЦ РФ ТРИНИТИ (г. Москва, Троицк) на установке АНГАРА-5-1 проводятся эксперименты по сжатию Z-пинчей с целью создания устойчивого компактного источника мягкого рентгеновского излучения (МРИ) большой мощности для реализации различных схем зажигания термоядерной мишени по программе УТС и исследования свойств вещества при высокой плотности энергии. Результаты этих исследований отражены в работах [1-6], а также и в других публикациях данного коллектива.

Сильноточный генератор АНГАРА-5-1 создает ток разряда I , имеющий форму

$$I(t) = I_0 \sin^2\left(\frac{\pi}{2T}t\right), \text{ амплитуда } I_0 = 4 \text{ МА, время нарастания } T = 100 \text{ нс.} \quad (1)$$

В качестве нагрузки используются одиночные и вложенные многопроволочные сборки различных конструкций: металлические (W, Al, Cu, Mo), полимерные и комбинированные. Количество проволок в сборке от 30 до 80, проводятся также эксперименты с малым числом проволок (4, 8). Диаметр проволоки в зависимости от материала составляет от 4 до 20 мкм. Образцы таких сборок и их характерные размеры приведены на рис. 1. Сверху находится анод, снизу – катод.

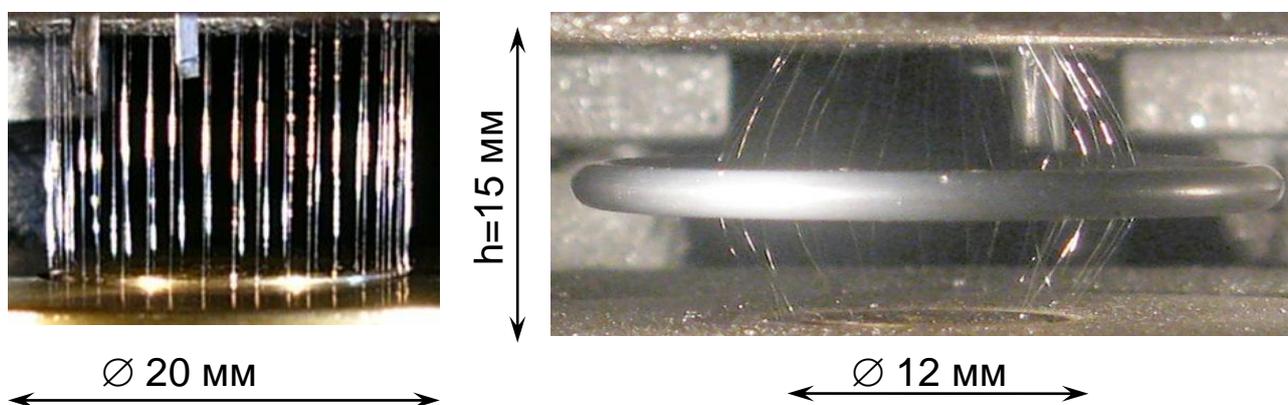


Рис. 1. Фотографии проволочных сборок перед экспериментом (ТРИНИТИ).

Для регистрации состояния плазменных потоков внутри сжимающегося лайнера осуществляется измерение напряженности магнитного поля посредством микрозондов, разработанных в ГНЦ РФ ТРИНИТИ [7], а также проводятся электротехнические измерения, спектральные измерения рентгеновского импульса, лазерное теневое зондирование с высоким разрешением, получают щелевые развертки и кадровые рентгеновские изображения, обскурограммы и др. Применение таких диагностических инструментов позволяет получить весьма подробную пространственную и временную картину сжимающейся плазмы, пригодную для сопоставления с результатами гидродинамических расчетов.

Электродинамически ускоряемая плазма подвержена влиянию магнитной Рэлей-Тейлоровской (МРТ) неустойчивости, которая, как правило, развивается на финальных стадиях сжатия после окончания плазмообразования. Источником развития неустойчивостей сжатия Z-пинча служит неоднородность границы плазма–вакуум, обусловленная как неравномерностью генерации плазмы по длине проволок, так и наличием межпроволочных промежутков. Отставание части плазмы на периферии сборки («отставшая масса» – «trailing mass») создает условия для появления дополнительного пути шунтирования тока по проводящему веществу, что может приводить к увеличению конечного радиуса сжатия и уменьшению мощности импульса излучения. На рис. 2 приведены полученные в ТРИНИТИ кадровые рентгеновские изображения ($h\nu > 20$ эВ) сжатия вольфрамовой проволочной сборки (40 б мкм проволок, 220 мкг/см, диаметр сборки 10 мм, высота 15 мм), на которых хорошо прослеживаются последовательные моменты развития МРТ неустойчивости.

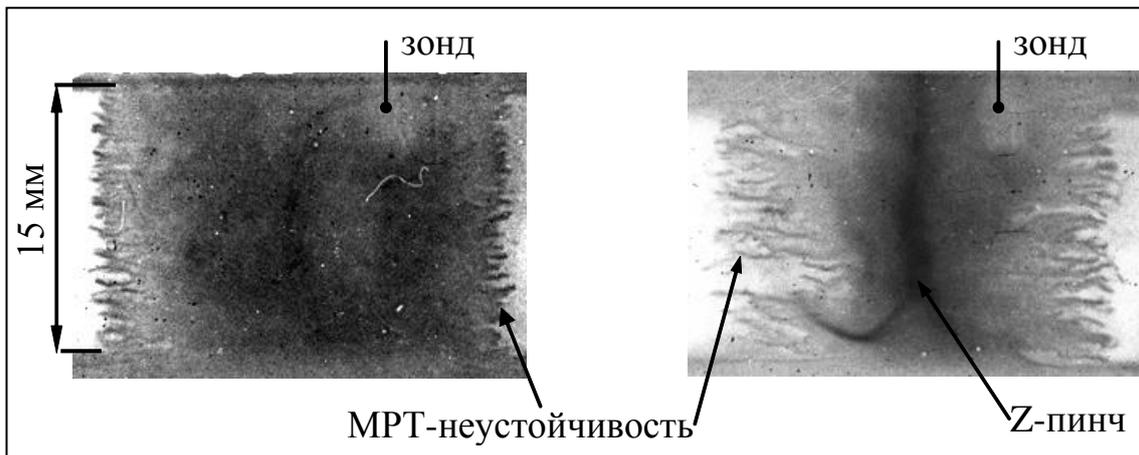


Рис. 2. Сжатие одиночной проволочной сборки (ТРИНИТИ):
слева – начало развития неустойчивости,
справа – отставшие массы в момент формирования Z-пинча.

Использование многопроволочныхборок позволяет снизить уровень неустойчивости плазмы пинча по сравнению со сплошными оболочками. Одним из методов дальнейшей оптимизации является применение вложенных проволочныхборок, состоящих из 2 и более каскадов. Вложенныеборок обеспечивают лучшую повторяемость, более высокую мощность и меньшую длительность импульса МРИ. Результаты выполненных к настоящему моменту в ТРИНИТИ исследований сжатия вложенныхборок подробно описаны в работах [5, 6]. В экспериментах наблюдалось теоретически предсказанное формирование стоячей ударной волны между каскадами и подавление ею развития неустойчивостей. Численное моделирование помогает более подробно изучить зависимость режимов сжатия от особенностей конструкцииборок.

2 Математические модели

Для моделирования имплозии плазмы используется РМГД код MARPLE_3D, разработанный в ИПМ им. М. В. Келдыша РАН [8]. В коде реализованы модель одножидкостной двухтемпературной магнитной гидродинамики с учетом анизотропии диссипативных процессов в условиях замагниченности и многогрупповое диффузионное приближение для переноса излучения [9].

Данные по уравнениям состояния и оптическим свойствам вещества были рассчитаны с помощью программы THERMOS (разработка ИПМ им. М. В. Келдыша РАН) [10], основанной на приближении среднего атома и использующей для расчётов самосогласованный потенциал Хартри–Фока–Слэтера [11]. В представленных расчетах используются 36 спектральных групп.

Для описания испарения проволок под действием разрядного тока применяется полуэмпирическая модель [12], учитывающая экспериментальные данные о продолжительности плазмообразования. Скорость образования низкоплотной плазмы из высокоплотной, приведенная к единице площади, dm/dt [г/(см²·с)] вычисляется по формуле:

$$\dot{m}(t) = \begin{cases} kB(t)^2, & t < t_\alpha, \\ \frac{kB(t)^2}{M_0(1-\alpha)}(M_0 - m(t)), & t \geq t_\alpha. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь коэффициенты k и α выбираются на основании экспериментальных данных для конкретных материалов, $B(t)$ – локальное значение магнитной индукции, M_0 – полная масса сборки, t_α определяется из условия $m(t_\alpha) = \alpha M_0$.

Программная реализация источника плазмы позволяет адекватно воспроизводить отдельные проволоки сборки и промежутки между ними, а также моделировать неоднородное распределение массы и времени окончания плазмообразования по длине проволоки.

2.1. Постановка задачи

Были проведены вычислительные эксперименты по 3D моделированию цилиндрических вложенных двухкаскадныхборок, соответствующие экспериментам на установке АНГАРА-5-1, описанным в работе [6]. Все расчеты выполнялись для вольфрамовых проволок диаметром 6 мкм (и внешний, и внутренний каскады). Аксиальные неоднородности не рассматривались. Высота сборки соответствовала экспериментальной ($H = 16$ мм), выход излучения рассчитывался для полной сборки. Диаметр внешнего каскада составлял 1 см, диаметр внутреннего каскада варьировался. Количество проволок внутреннего каскада во всех расчетах 40 (погонная масса

220 мкг/см), количество проволок во внешнем каскаде варьировалось. Ток генератора задавался в форме (1), что близко соответствует экспериментальным токам в работе [6].

Схема экспериментальной установки изображена на рис. 3.

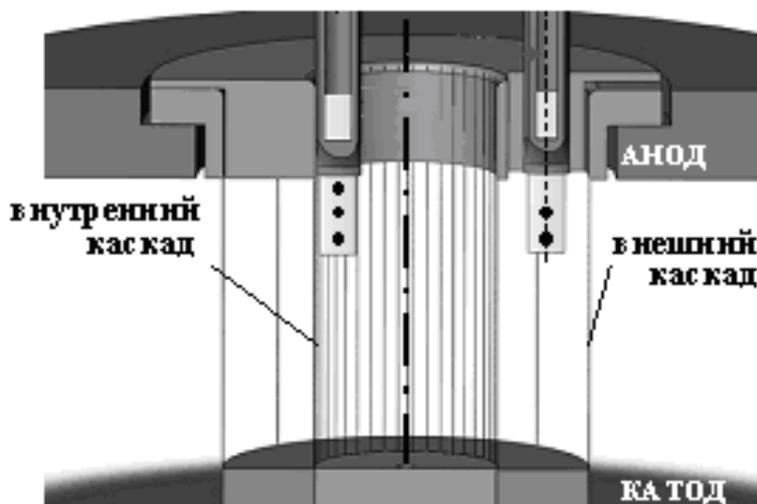


Рис. 3. Двухкаскадная цилиндрическая проволочная сборка.

2.2. Расчетные области и сетки

Код MARPLE_3D предназначен для работы с сетками нерегулярной структуры. Расчеты сжатия многопроволочных сборок в данной работе выполняются в области, имеющей форму сектора (части разрядной камеры установки АНГАРА-5-1) с периодическими граничными условиями (ГУ). Блочно-структурированная расчетная сетка состоит из 2÷4 миллионов ячеек – шестигранников и треугольных призм, адаптированных к границе области. Характерные размеры ячеек: в плоскости (x, y) ~ 65 мкм на радиусе внешнего каскада и ~ 7 мкм вблизи оси сборки, $h_z = 160 \div 40$ мкм. На рис. 4 приведен пример расчетной сетки, предназначенной для моделирования квазисферической сборки из 40 проволок с профилированными электродами в форме усеченного конуса. Данная расчетная область соответствует 1/8 сборки (5 проволок), разрешение отдельных проволок на сетке видно на рисунке справа. Зазор между проволоками разрешен на 20 расчетных ячейках, что позволяет адекватно воспроизводить движение плазменных струй до момента их слияния. Для моделирования цилиндрических сборок применяются более простые области такого же типа в форме цилиндрических секторов 45° и 90° .

Код MARPLE_3D использует декомпозицию расчетной области и MPI-параллелизм для выполнения расчетов на высокопроизводительных многопроцессорных кластерах. Время счета одного типового варианта на 256 ядрах составляет 30÷40 часов.

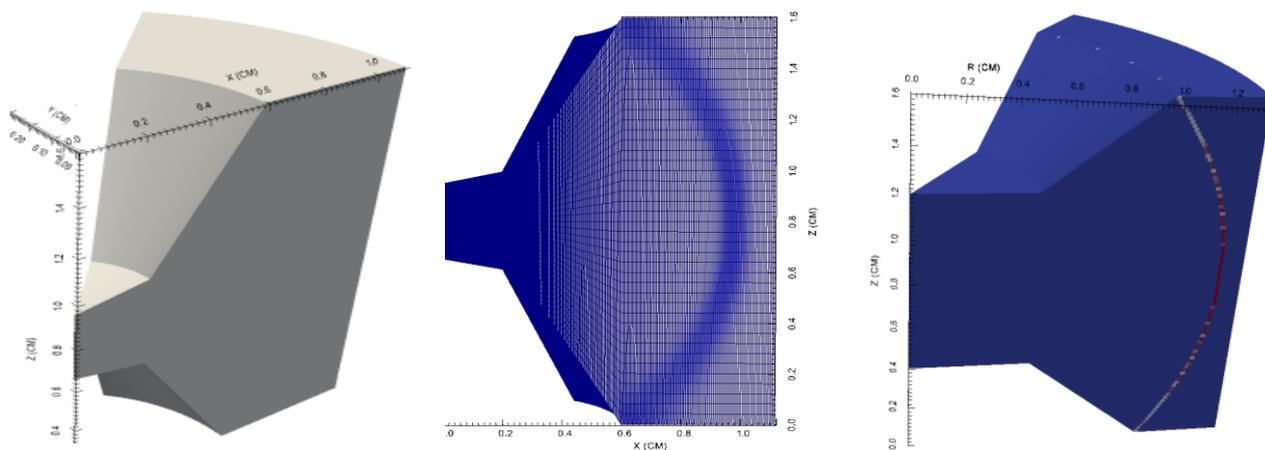


Рис. 4. Расчетная область и сетка.

3 Динамика плазмы в двухкаскадных лайнерах

Теоретический анализ характера сжатия плазмы в двухкаскадных проволочных сборках был выполнен в работе [13] на основании одномерной стационарной модели течения плазмы с учетом длительного плазмообразования. Было показано, что реализация одного из трех типов течения плазмы в пространстве между каскадами вложенныхборок зависит от соотношения интенсивностей плазмообразования на внутреннем и внешнем каскадах и отношения радиусовборок в соответствии с диаграммой, приведенной на рис. 5.

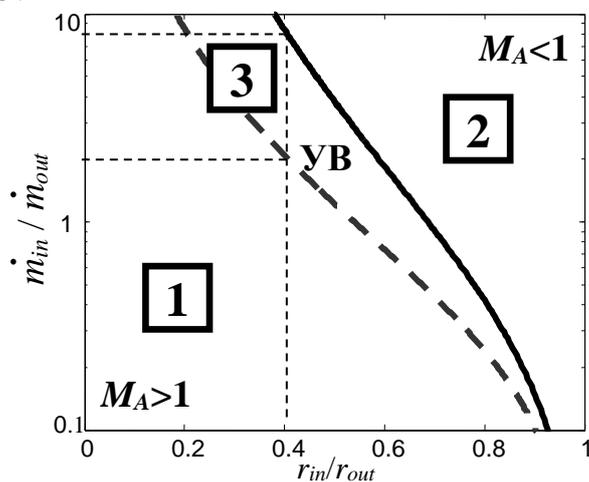


Рис. 5. Режимы течения плазмы в двухкаскадных проволочных сборках [13].

1. Сверхальфвеновский режим ($M_A > 1$). Почти весь ток течет по внешнему каскаду.
2. Доальфвеновский режим ($M_A < 1$). До 80% полного тока протекает по внутреннему каскаду и внутри него.

3. Переходный режим от сверхальфвеновского течения плазмы с внешнего каскада к доальфвеновскому течению вблизи внутреннего каскада с образованием стоячей ударной волны (УВ) в пространстве между каскадами.

На рис. 6 показано радиальное распределение параметров плазмы между каскадами вложенныхборок, предсказанное одномерной теорией.

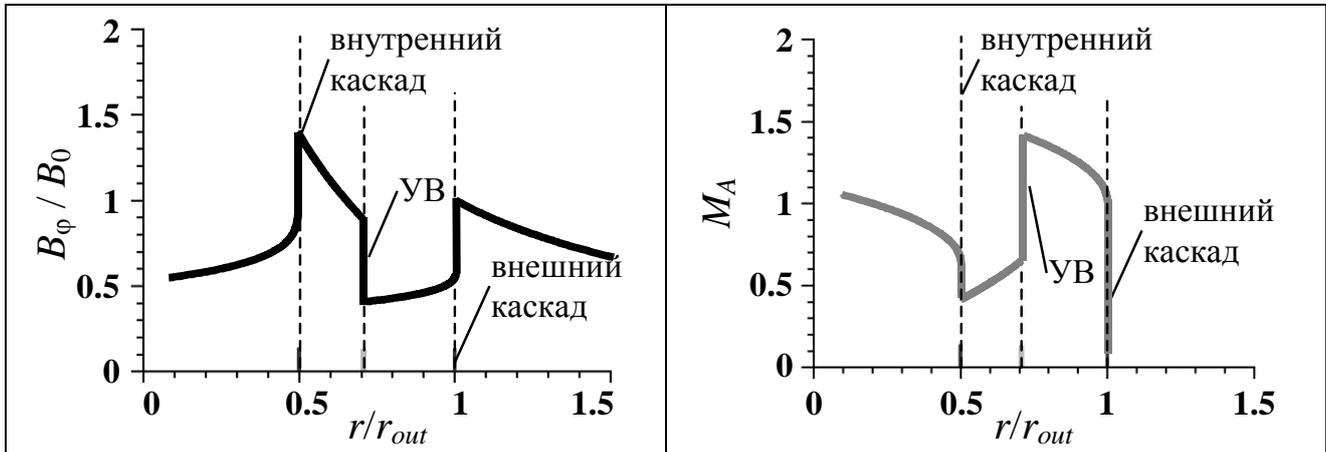


Рис. 6. Распределение магнитной индукции (слева) и магнитного числа Маха (справа) в двухкаскадных проволочных сборках [13].

Здесь r – координата вдоль радиуса сборки, r_{out} – радиус внешнего каскада, B_ϕ – азимутальная компонента вектора магнитной индукции, B_0 – её значение на внешнем каскаде, $M_A = v/v_A$ – магнитное число Маха.

На рис. 7 приведены результаты экспериментального наблюдения в ТРИНИТИ с помощью кадрового лазерного теневого зондирования области формирования ударной волны в пространстве между каскадами цилиндрической вложенной сборки.

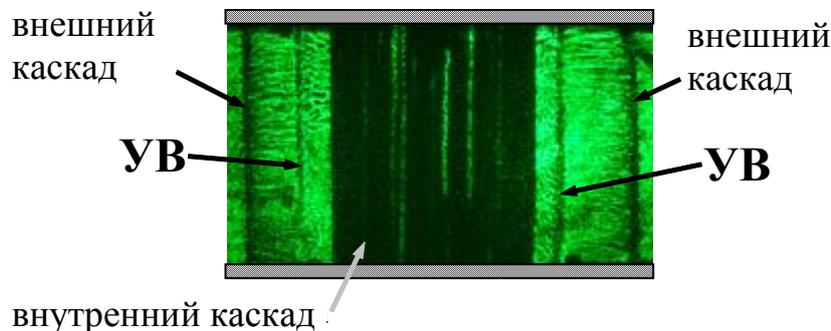


Рис. 7. Ударная волна между каскадами [6].

4 Динамика формирования УВ в зависимости от отношения радиусов внешнего и внутреннего каскадов

С целью исследования условий образования УВ между каскадами в зависимости от отношения радиусов внешнего и внутреннего каскадов было выполнено трехмерное моделирование двухкаскадных цилиндрических вложенныхборок со следующими параметрами:

- радиус внешнего каскада $r_{out}=1$ см;
- отношения радиусов внутреннего и внешнего каскадов $r_{in}/r_{out}=0,3, 0,5$ и $0,8$;
- количество проволок во внутреннем и внешнем каскадах $N_{out}=N_{in}=40$, погонная масса $M=220$ мкг/см;
- расчетная область: $1/8$ цилиндра (периодические ГУ), в расчете участвуют 5 проволок на каждом каскаде, внутренние проволоки сдвинуты на $1/4$ периода относительно внешних.

Ниже приведены результаты моделирования.

1) $r_{in}/r_{out} = 0,3$

Динамика сжатия вложенныхборок (время отсчитывается от начала тока разряда):

- $t = 30$ нс – начало плазмообразования внешнего каскада;
- $t = 55$ нс – столкновение плазменных струй внешнего каскада с проволоками внутреннего каскада, начало плазмообразования внутреннего каскада;
- $t = 60$ нс – скорость плазмообразования внутреннего каскада превысила скорость плазмообразования внешнего каскада, $\dot{m}_{in} > \dot{m}_{out}$, начало формирования ударной волны;
- $t = 76$ нс – окончание плазмообразования внешнего каскада;
- $t = 95$ нс – окончание плазмообразования внутреннего каскада;
- $t = 120$ нс – максимальное сжатие Z-пинча, максимум импульса МРИ.

Динамика плазмообразования показана на графиках рис. 8. Сплошные линии относятся к внутреннему каскаду, штрихпунктирные – к внешнему. Красные линии – испаренная масса в мкг, синие – скорость плазмообразования в $\text{г}/(\text{мкс} \cdot \text{см}^2)$.

При малом радиусе внутреннего каскада ($r_{in}/r_{out}=0,3$) в пространстве между каскадами формируется ударная волна, которая все время своего существования остается прижата к внутреннему каскаду на расстоянии $r_{yB} = 0,34$ см от оси сборки (см. рис. 9, 10). Экспериментально зафиксированное положение ударной волны $r_{yB} = 0,3 \div 0,32$ см [6]. Распределение азимутальной компоненты вектора магнитной индукции и магнитного числа Маха вдоль радиуса сборки (рис. 10) согласуется с теоретически предсказанным (рис. 6).

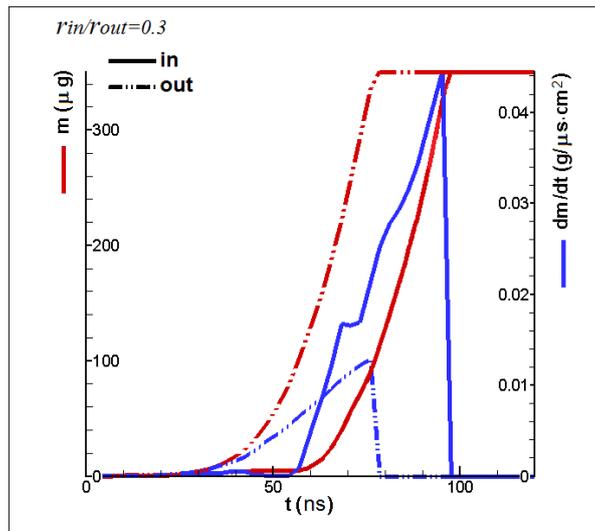


Рис. 8. Скорость плазмообразования.

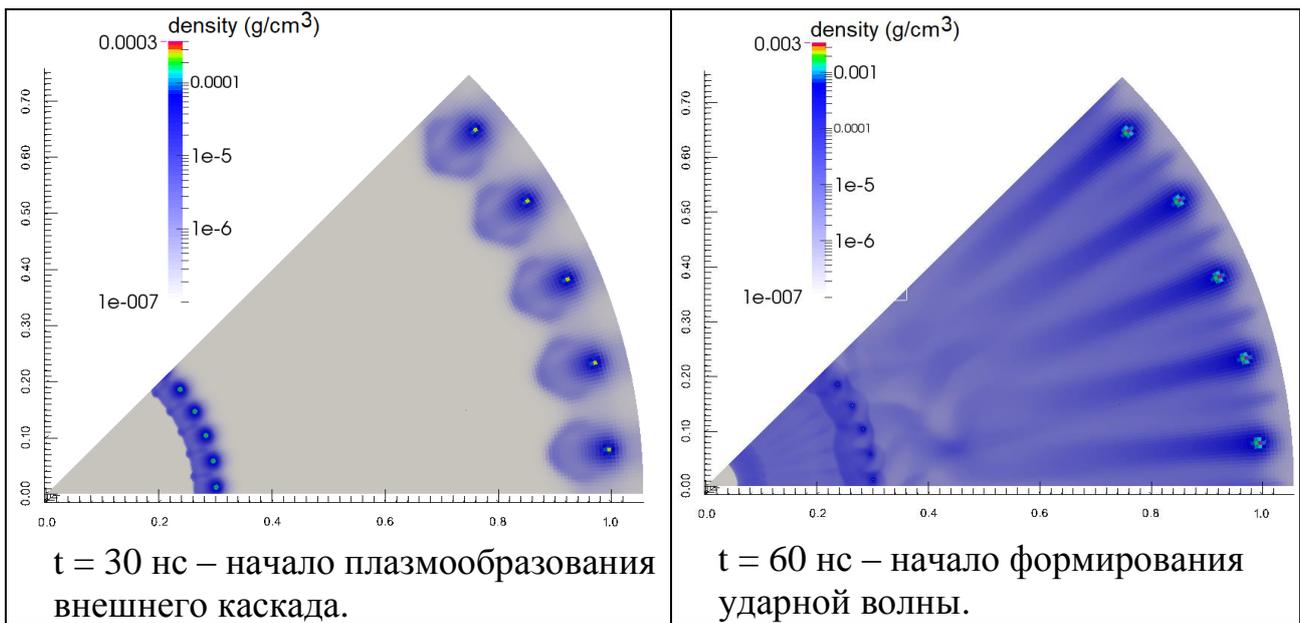
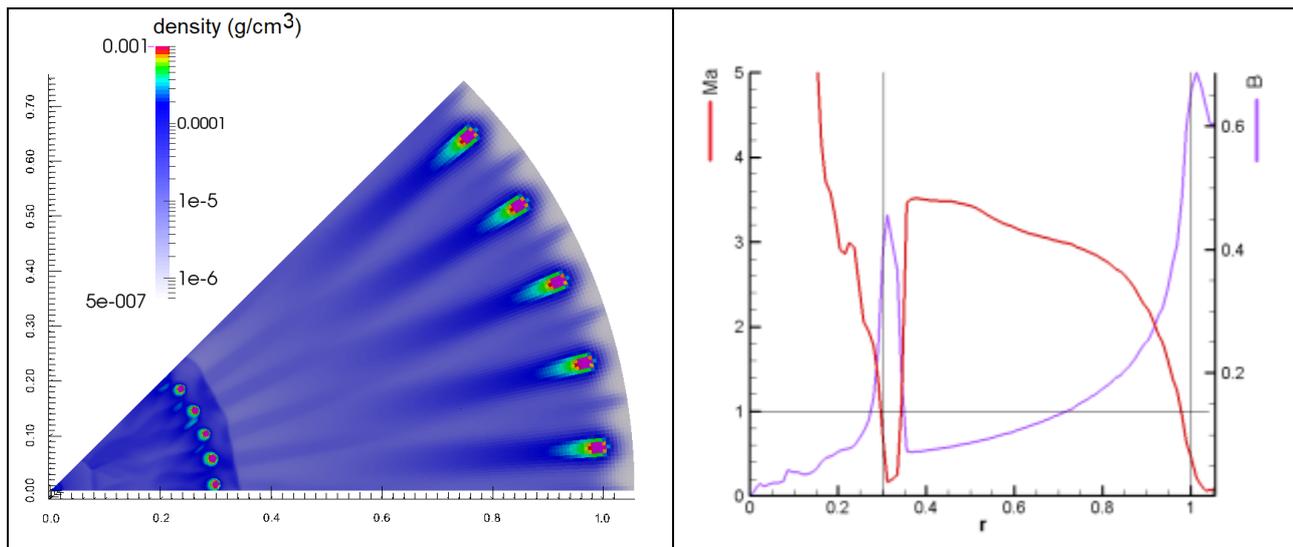


Рис. 9. Распределение плотности плазмы.

Показаны распределения плотности плазмы в плоскости (x,y) , расстояния указаны в см.



$t = 70$ нс - 90 нс – время существования ударной волны.

Рис. 10. Распределение плотности плазмы (слева), распределение магнитной индукции и магнитного числа Маха (справа).

На рис. 10 справа r – координата вдоль радиуса сборки в см, $B = B_\phi$ – магнитная индукция в МГс – сиреневая линия, $M_a = v/v_A$ – магнитное число Маха – красная линия, вертикальными линиями показано положение внутреннего и внешнего каскадов.

2) $r_{in}/r_{out} = 0.5$

Динамика сжатия вложенныхборок:

- $t = 30$ нс – начало плазмообразования внешнего каскада;
- $t = 50$ нс – столкновение плазменных струй внешнего каскада с проволоками внутреннего каскада, начало плазмообразования внутреннего каскада;
- $t = 55$ нс – наблюдается резкий скачок скорости плазмообразования внутреннего каскада, $\dot{m}_{in} > \dot{m}_{out}$, начало формирования ударной волны;
- $t = 80$ нс – окончание плазмообразования внешнего каскада;
- $t = 90$ нс – окончание плазмообразования внутреннего каскада;
- $t = 125$ нс – максимальное сжатие Z-пинча, максимум импульса МРИ.

Динамика плазмообразования показана на графиках рис. 11. Сплошные линии относятся к внутреннему каскаду, штрихпунктирные – к внешнему. Красные линии – испаренная масса в мкг, синие – скорость плазмообразования в $\text{г}/(\text{мкс} \cdot \text{см}^2)$.

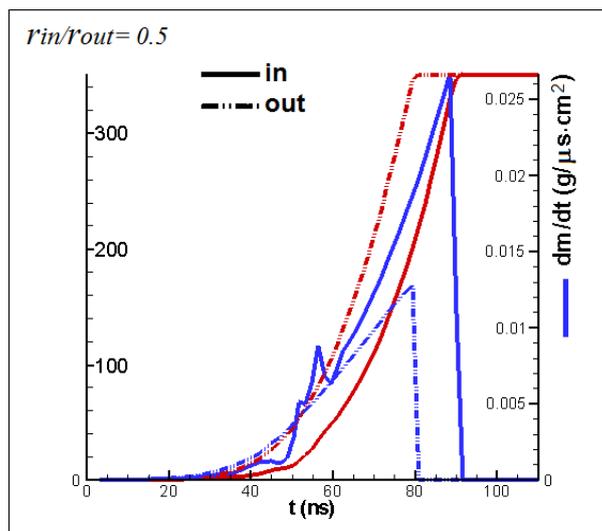


Рис. 11. Скорость плазмообразования.

При среднем радиусе внутреннего каскада ($r_{in}/r_{out}=0,5$) между каскадами формируется ударная волна, хорошо прослеживается ее смещение в пространстве между каскадами (см. рис. 12). Ударная волна формируется вблизи внутреннего каскада на расстоянии $r_{УВ} = 0,54$ см от оси сборки в момент резкого скачка скорости плазмообразования внутреннего каскада ($t = 57$ нс). Устойчивому положению ударной волны соответствует $r_{УВ} = 0,6$ см ($t = 60$ нс – 90 нс). К моменту распада ($t = 90$ нс) ударная волна смещается до $r_{УВ} = 0,7$ см. Смещение ударной волны наблюдалось и в эксперименте, экспериментально зафиксированное положение ударной волны $r_{УВ} = 0,54 \div 0,6$ см [6].

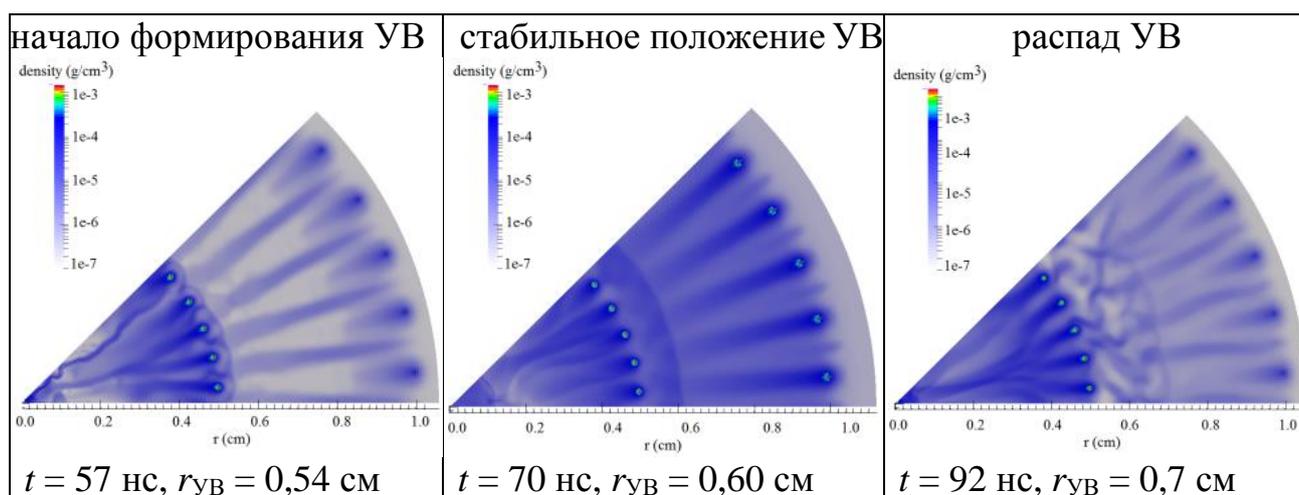
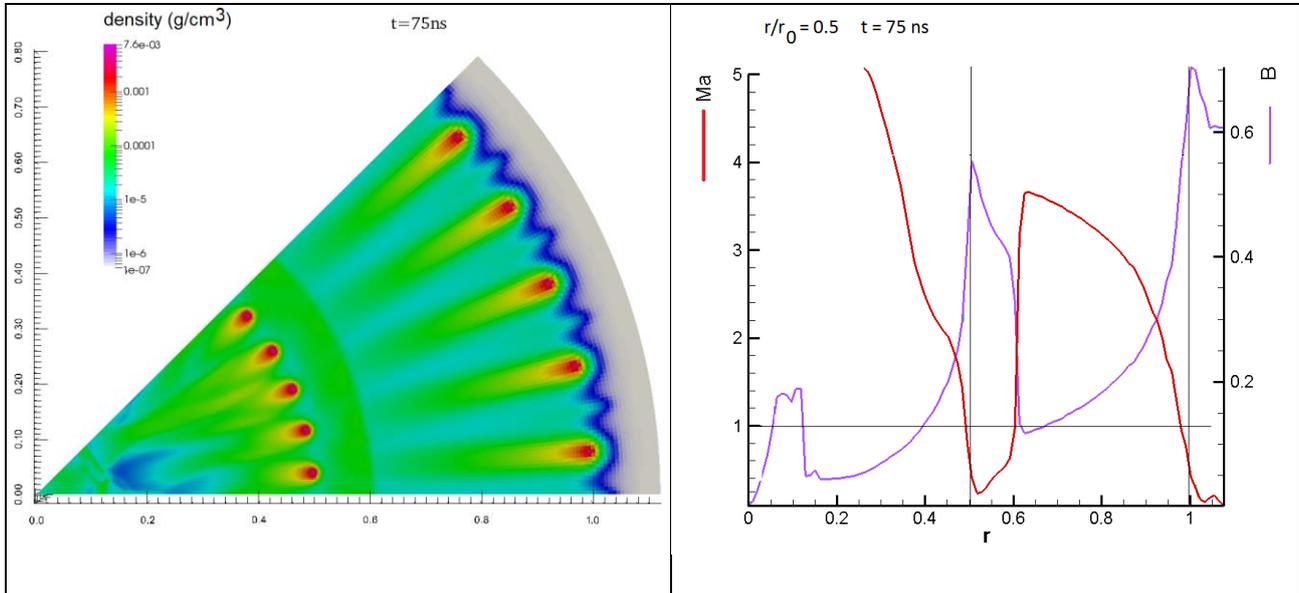


Рис. 12. Распределение плотности плазмы (слева),
распределение магнитной индукции и магнитного числа Маха (справа).

Распределение азимутальной компоненты вектора магнитной индукции и магнитного числа Маха вдоль радиуса сборки (рис. 13) согласуется с теоретически предсказанным (рис. 6). Обозначения те же, что на рис. 10.



$t = 60 \text{ нс} - 90 \text{ нс}$ – время существования ударной волны.

Рис. 13. Распределение плотности плазмы (слева), распределение магнитной индукции и магнитного числа Маха (справа).

3) $r_{in}/r_{out} = 0,8$

При большом радиусе внутреннего каскада ($r_{in}/r_{out}=0,8$) ударная волна между каскадами не формируется (см. рис. 14). Ток почти сразу передается на внутренний каскад, скорость плазмообразования внутреннего каскада все время меньше, чем внешнего, $\dot{m}_{in} < \dot{m}_{out}$. Динамика плазмообразования показана на графиках рис. 15.

Динамика сжатия вложенныхборок:

- $t = 30 \text{ нс}$ – начало плазмообразования практически одновременно на внутреннем и внешнем каскадах;
- $t = 80 \text{ нс}$ – окончание плазмообразования внешнего каскада;
- $t = 95 \text{ нс}$ – окончание плазмообразования внутреннего каскада;
- $t = 130 \text{ нс}$ – максимальное сжатие Z-пинча, максимум импульса МРИ.

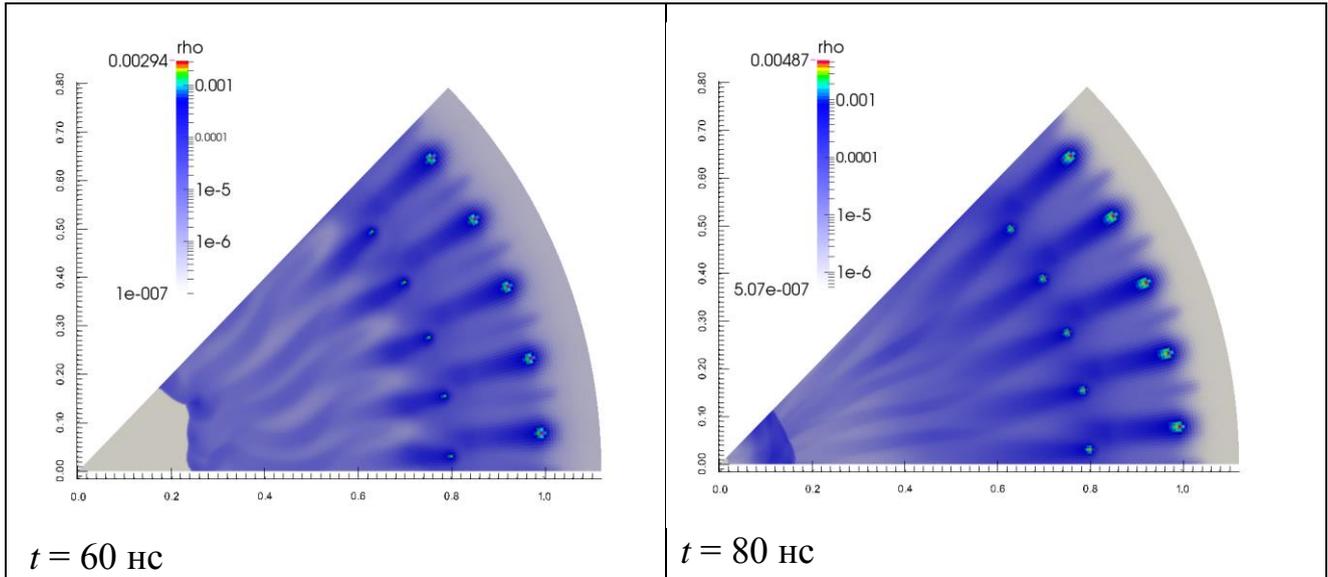


Рис. 14. Распределение плотности плазмы.

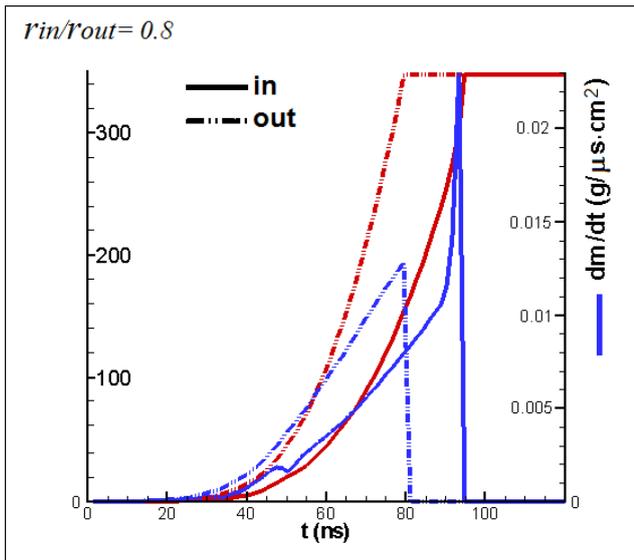


Рис. 15. Скорость плазмообразования.

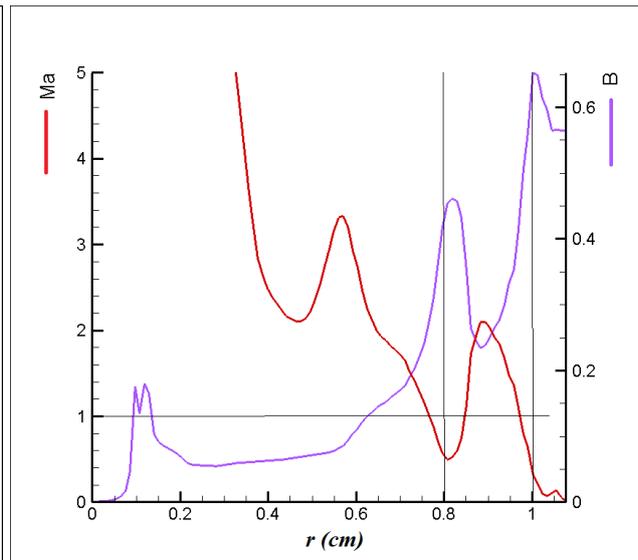


Рис. 16. Распределение магнитной индукции и магнитного числа Маха.

В данном случае реализуется доальфвеновский режим, распределение магнитной индукции и магнитного числа Маха в пространстве между каскадами значительно более гладкое, чем в первых двух рассмотренных случаях, изменение характера течения между каскадами не выражено (см. рис. 16). В эксперименте [6] существование ударной волны также не было зафиксировано.

Зависимость режимов сжатия двухкаскадных проволочных сборок от отношения темпов производства плазмы и отношения радиусов каскадов по результатам моделирования показана на рис. 17.

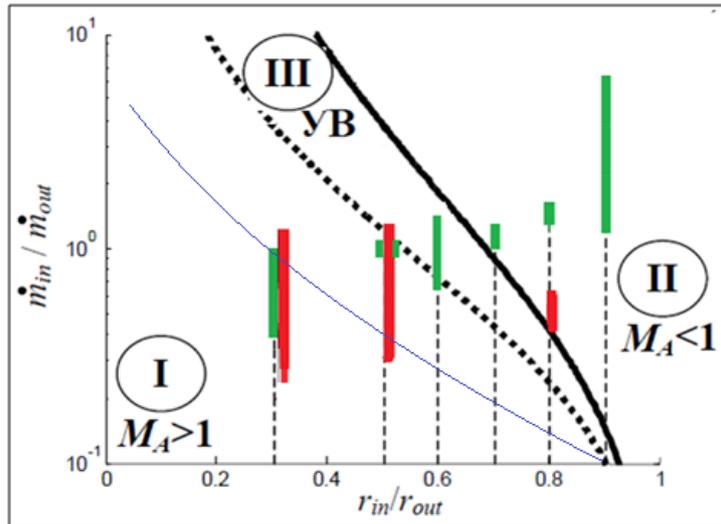


Рис. 17. Режимы сжатия двухкаскадных проволочных сборок.

Сплошная и пунктирная черные линии, ограничивающие область существования УВ, соответствуют 1D теории [13]. Зеленые линии – оценки, полученные в [6] на основании эмпирической формулы для скорости плазмообразования

$$\dot{m} = K \left(\frac{I}{r} \right)^2 \Rightarrow \frac{\dot{m}_{in}}{\dot{m}_{out}} = \frac{K_{in}}{K_{out}} \cdot \left(\frac{I_{in}}{I_{out}} \right)^2 \cdot \left(\frac{r_{out}}{r_{in}} \right)^2.$$

Для оценок использовались измеренные в экспериментах значения K_{in}/K_{out} и I_{in}/I_{out} .

Красные линии – расчетные результаты данной работы.

Сопоставление этих результатов с экспериментальными данными и оценками работы [6] качественно подтверждает одномерную теорию [13]. Поскольку эта теория не учитывает нестационарные эффекты, можно предположить, что пунктирная кривая должна проходить ниже, приблизительно так, как показано тонкой синей линией.

5 Формирование замкнутой плазменной оболочки между каскадами

Для того чтобы ударная волна между каскадами вложенных сборок стабилизировала сжатие Z-пинча и подавляла неустойчивость его внешней границы, необходимо, чтобы между каскадами образовалась квазизамкнутая, по возможности однородная, плазменная оболочка. С целью исследования условий её формирования было проведено моделирование вложенных сборок с различным числом проволок на внешнем каскаде. Количество проволок во внутреннем каскаде во всех случаях $N_{in}=40$, погонная масса $M=220$ мкг/см.

1) $N_{in}=40, N_{out}=4$

В случае 4 проволок во внешнем каскаде при отношении радиусов $r_{in}/r_{out} = 0,5$ замкнутая оболочка не образуется. Плазменные струи с внешних проволок тормозятся на внешней поверхности внутреннего каскада, но не успевают растечься по всей окружности. В результате испарение внутренних проволок идет неравномерно, стабилизации не происходит (рис. 18, а). При отношении радиусов $r_{in}/r_{out} = 0,3$ внутренняя окружность меньше, потоки плазмы успевают замкнуть оболочку уже после завершения плазмообразования внешнего каскада, оболочка сильно неоднородная по азимутальному направлению (рис. 18, б).

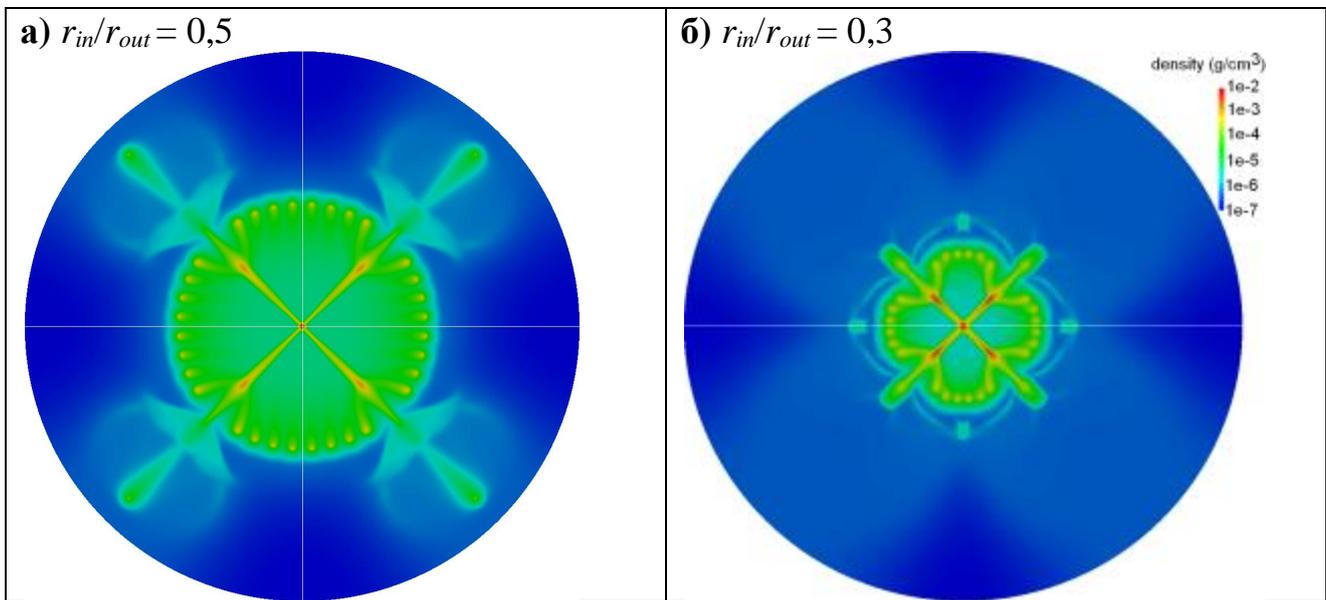


Рис. 18. Формирование плазменной оболочки, $N_{out}=4, t = 75$ нс.

2) $N_{in}=40, N_{out}=8$

Уже при 8 проволоках во внешнем каскаде при отношении радиусов $r_{in}/r_{out} = 0,5$ формируется квазизамкнутая оболочка (рис. 19). Плазменные струи с внешних проволок тормозятся магнитным полем внутреннего каскада и растекаются по силовым линиям магнитного поля. По сравнению с первым рассмотренным случаем оболочка значительно более однородная и испарение внутренних проволок идет более равномерно.

В случае 16 внешних проволок формирование ударной волны происходит качественно так же, как для рассмотренной ранее многопроволочной внешней сборки.

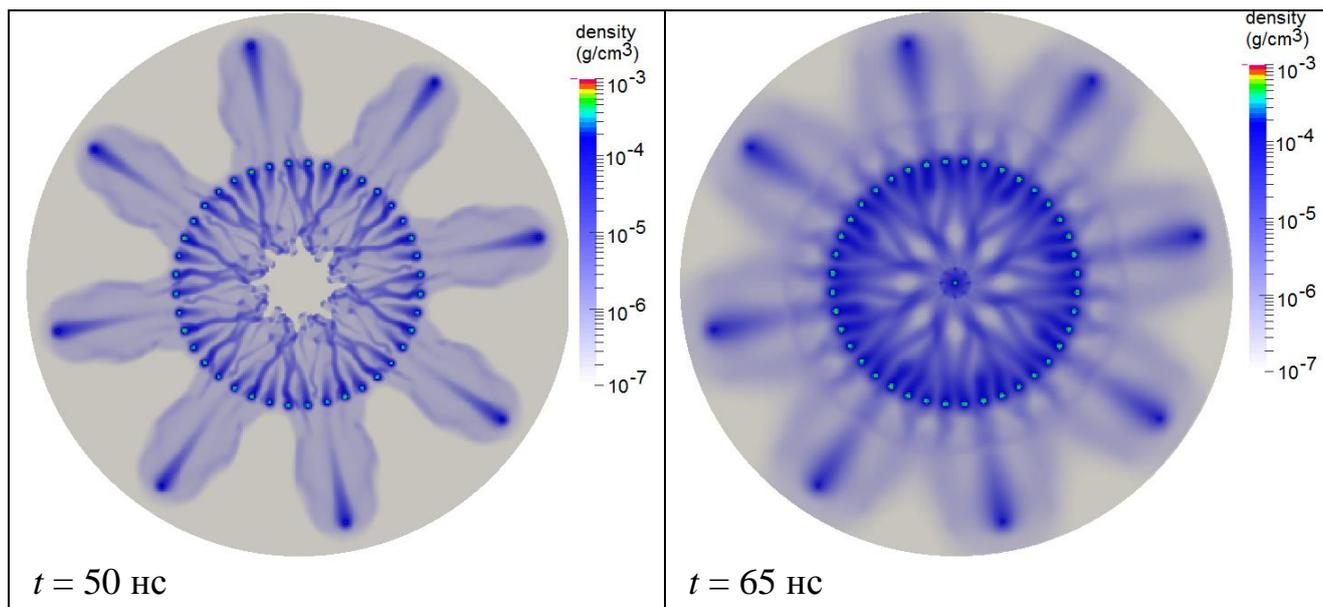


Рис. 19. Формирование плазменной оболочки, $N_{out}=8$.

3) Подавление неустойчивости на внешней стороне внутреннего каскада

Важным условием устойчивого сжатия пинча является однородность распределения плазмы внутри сборки. Ниже приведены оценки однородности сжатия для двухкаскадной сборки $N_{in}=N_{out}=40$, $r_{in}/r_{out}=0,5$ на момент $t = 70$ нс, соответствующий устойчивому положению ударной волны $r_{УВ} = 0,6$ см.

На рис. 20 показано распределение параметров плазмы в зависимости от угла φ на поверхности цилиндра $r = 0,6$ см, характеризующее степень однородности сформированной плазменной оболочки.

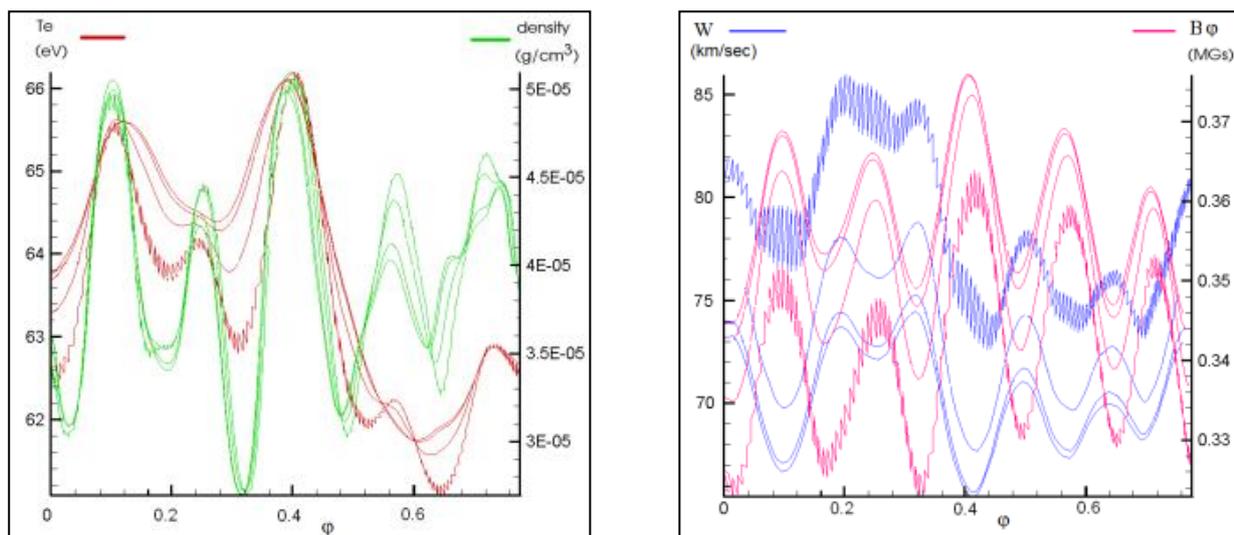


Рис. 20. Распределение параметров плазмы в области УВ (плотность и температура – слева, скорость и магнитная индукция – справа).

На рис. 21 сплошной линией — показано распределение параметров плазмы вдоль радиуса сборки по центру проволоки внешнего каскада, штрихпунктирной - - - - - между проволоками. Синими вертикальными линиями отмечено начальное положение проволок, черной линией – положение УВ.

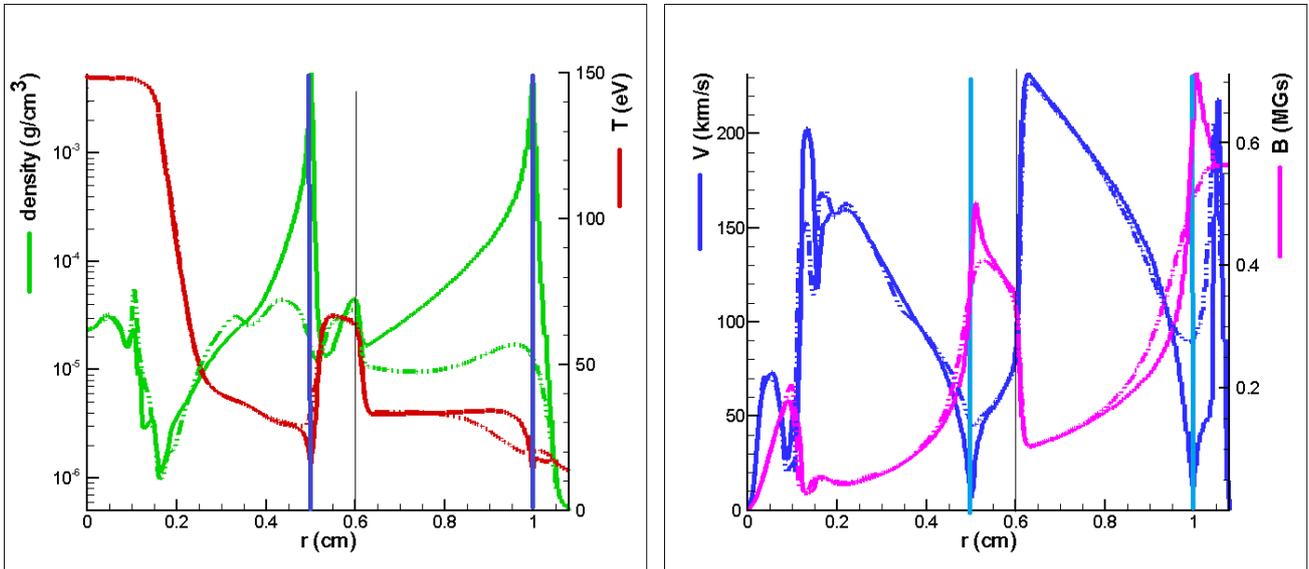


Рис. 21. Распределение параметров плазмы вдоль радиуса сборки (плотность и температура – слева, скорость и магнитная индукция – справа).

Наибольшая разница значений в пределах плазменной оболочки наблюдается по плотности, тем не менее плотность по всей окружности достаточно высокая – от $3 \cdot 10^{-5}$ до $5 \cdot 10^{-5}$ г/см³, разрывов нет. Распределение параметров внутри внутренней сборки характеризуется высокой степенью однородности, что можно объяснить стабилизирующим влиянием УВ.

6 Квазисферическая двухкаскадная сборка

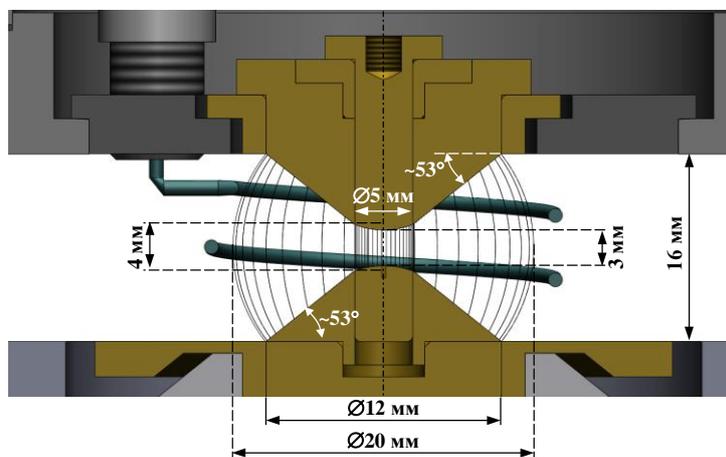


Рис. 22. Квазисферическая двухкаскадная сборка.

Перспективная конструкция лайнера (рис. 22), предложенная в ТРИНИТИ, позволит сочетать преимущества вложенныхборок и квазисферического сжатия. Двухкаскадная сборка повышает устойчивость пинча, а квазисферическая сборка с профилированными электродами обеспечивает компактность и высокую плотность мощности источника МРИ [2].

Было выполнено 3D моделирование проволочной сборки со следующими параметрами:

- внешний каскад: 40 W проволочек диаметром 6 мкм, линейная масса 220 мкг/см, радиус сборки $R = 6$ мм, высота сборки $H = 16$ мм, длина проволочек $L = 18$ мм.
- внутренний каскад: 80 W проволочек диаметром 6 мкм, линейная масса 440 мкг/см, радиус сборки $r = 2,5$ мм, высота сборки $H = 3$ мм.

Форма электродов соответствует изображенной на рис. 22.

Результаты моделирования представлены на рис. 23-25. Несмотря на достаточно сложную картину распределения плазмы в объеме сборки, можно с уверенностью сделать вывод, что в межкаскадном пространстве по всей высоте внутренней сборки формируется ударная волна аналогично тому, как это имеет место в рассмотренных выше цилиндрических вложенныхбороках, однако форма плазменной оболочки не является цилиндрической, хотя кривизна ее меньше кривизны исходной квазисферы.

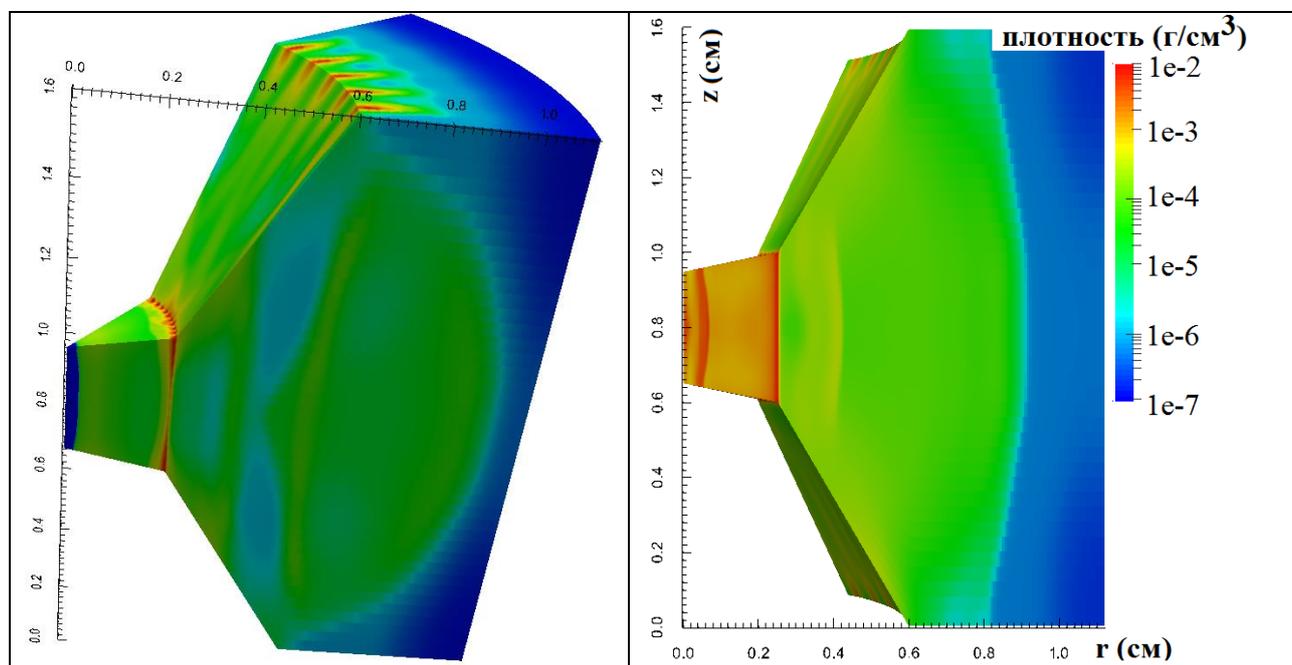


Рис. 23. Распределение плазмы в объеме сборки.

Образование замкнутой плазменной оболочки начинается в "экваториальном" сечении вблизи внутреннего каскада и происходит не одновременно по высоте сборки. Ближе к электродам ударная волна слабо

выражена. Этапы формирования ударной волны в экваториальном сечении квазисферической двухкаскадной сборки показаны на рис. 24.

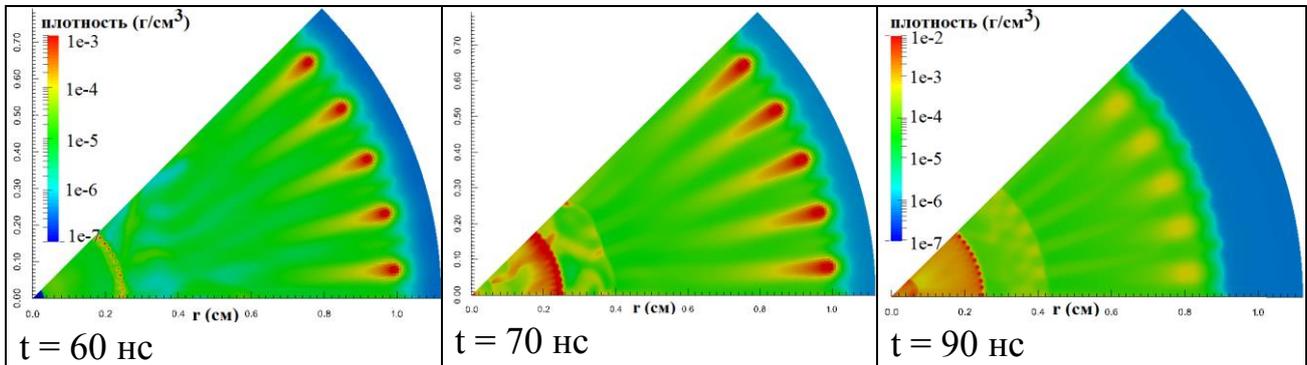


Рис. 24. Ударная волна в квазисферической двухкаскадной сборке.

Динамика скорости плазмообразования и распределение магнитной индукции и магнитного числа Маха качественно соответствуют одномерной теории [13]. Имеет место резкий рост скорости плазмообразования внутреннего каскада в момент начала формирования ударной волны (см. рис. 25, слева). Распределение магнитной индукции и магнитного числа Маха вдоль радиуса показано для экваториального сечения. Четко выделяются зоны сверхальфвеновского и доальфвеновского течений и переходная зона, соответствующая положению ударной волны.

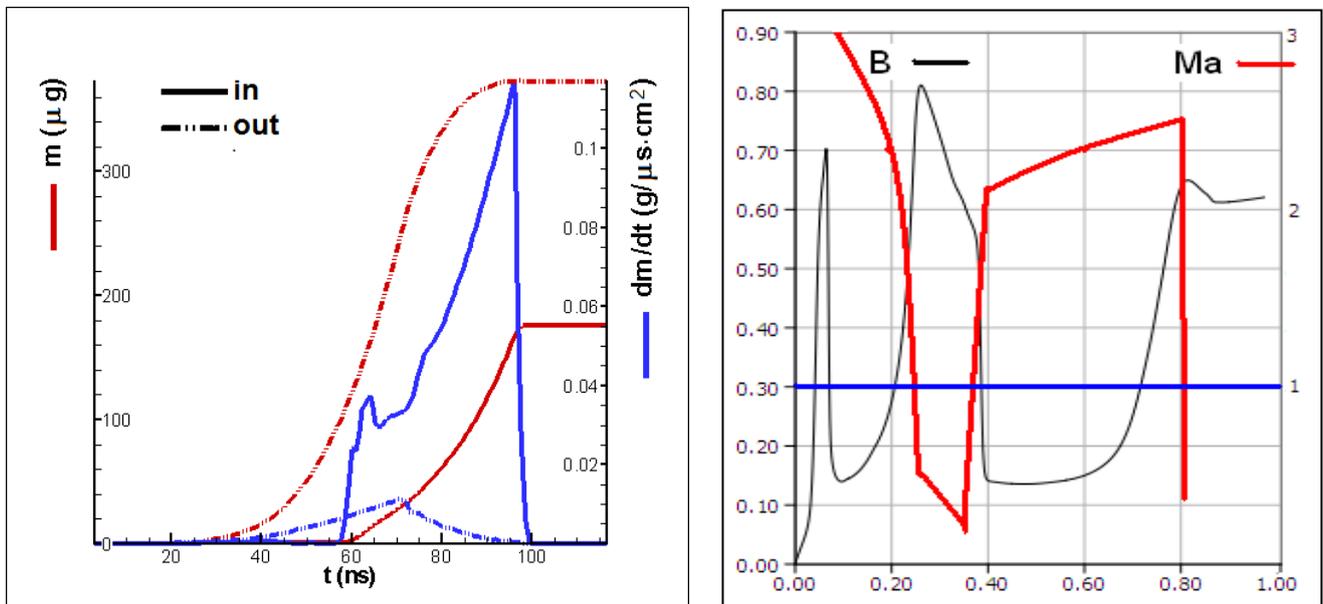


Рис. 25. Скорость плазмообразования (слева), распределение магнитной индукции и магнитного числа Маха (справа).

Следует отметить, что оптимизация конструкции квазисферической двухкаскадной сборки требует дополнительных исследований. Необходимо

изучить как условия формирования ударной волны, так и ее влияние на параметры импульса МРИ. Роль численных экспериментов в таких исследованиях очень велика.

7 Заключение

1) Показано качественное и количественное соответствие результатов расчетов с экспериментальными данными и теоретическими оценками.

2) Подтверждено, что двухкаскадная конструкция позволяет добиться устойчивого компактного сжатия. Между каскадами формируется ударная волна, которая гасит неоднородности плазменных струй. Эффект наблюдается и том случае, когда внешний и внутренний каскады изготовлены из одного материала.

3) При малом числе проволок внешнего каскада замкнутая плазменная оболочка успевает сформироваться только при малом радиусе внутреннего каскада. В случае внешних вольфрамовых проволок оболочка сильно неоднородная.

4) Наблюдается уменьшение отставшей плазмы в момент образования Z-пинча. Уменьшение отставшей массы более выражено в случае квазисферической сборки.

5) Дальнейшие планы:

– Моделирование полной сборки с целью исследования возможности развития винтовой неустойчивости вследствие аксиальной неоднородности плазмообразования и прорыва магнитного потока внутрь сборки. Для изучения этого вопроса требуется выполнение расчетов на весьма подробных сетках, чтобы воспроизвести существенно разномасштабные процессы (формирование "магнитных пузырей" и т.д.).

– Моделирование смешанных по составуборок, в том числе из полимерных нитей и пористых материалов.

Библиографический список

1. К. Н. Митрофанов и др. Исследование фазы окончания плазмообразования и формирования прорывов магнитного потока при имплозии проволочной сборки // Физика плазмы - 2014. - Т. 40, № 9. - С. 779-806.
2. В. В. Александров и др. Об увеличении плотности энергии в плазме пинча при трехмерном сжатии квазисферических проволочных лайнеров // Физика плазмы - 2014. - Т. 40, № 12. - С. 1057-1073.
3. А. С. Болдарев и др. Методы и результаты исследований спектров излучения мегаамперных Z-пинчей на установке Ангара-5-1 // Физика плазмы, 2015, т.41, № 2, с.195-199.
4. К. Н. Митрофанов и др. Динамика сжатия квазисферических проволочныхборок с различным профилированием линейной массы // Физика плазмы. 2016. Т. 42. № 9. С. 813-840.
5. К. Н. Митрофанов и др. Об устойчивости сжатия плазмы внутреннего каскада вложенныхборок // Физика плазмы. 2017. Т. 43. № 9. С. 751-764.
6. К. Н. Митрофанов и др. Исследование режимов течения плазмы при токовой имплозии двухкаскадных вложенныхборок // Физика плазмы. 2018. Т. 44. № 2. С. 157-192.
7. К. Н. Митрофанов и др. Исследование радиального распределения магнитного поля в плазме многопроволочныхборок на установке АНГАРА-5-1 // Физика плазмы, 2012, Т. 38, № 10, С. 866–889.
8. "Программный комплекс MARPLE", свидетельство о гос. регистрации № 2012660911 от 30.12.2012.
9. В. А. Гасилов и др. Пакет прикладных программ MARPLE3D для моделирования на высокопроизводительных ЭВМ импульсной магнитоускоренной плазмы // Математическое моделирование. – 2012. – Т. 24, № 1. – С. 55–87.
10. "THERMOS: Библиотека функций для расчета радиационных и термодинамических свойств", свидетельство о гос. регистрации № 2013616315 от 03.07.2013
11. А. Ф. Никифоров, В. Г. Новиков, В. Б. Уваров Квантово-статистические модели высокотемпературной плазмы – М: Физматлит, 2000. – 400 с.
12. В. В. Александров и др. Динамика гетерогенного лайнера с затянутым плазмообразованием // Физика плазмы, т.27, №2, 2001, с.99-120.
13. P. Satorov Dynamics of Plasma Jets in Multiwire Arrays // 6th Intern. Conf. on Dense Z-Pinches. Oxford. Ed.: J. Chittenden. AIP Conf. Proc. 2006. V. 808. P. 81.

Оглавление

1	Введение.....	3
2	Математические модели.....	5
	2.1. Постановка задачи	5
	2.2. Расчетные области и сетки.....	6
3	Динамика плазмы в двухкаскадных лайнерах	7
4	Динамика формирования УВ в зависимости от отношения радиусов внешнего и внутреннего каскадов.....	9
5	Формирование замкнутой плазменной оболочки между каскадами.....	15
6	Квазисферическая двухкаскадная сборка.....	18
7	Заключение	21
	Библиографический список.....	22