

ТРЕХМЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАЗИСФЕРИЧЕСКОГО СЖАТИЯ Z-ПИНЧА THREE-DIMENSIONAL MODELING OF QUASI-SPHERICAL Z-PINCHES IMPLOSION

К. С. Назаров, И. В. Глазырин, А. В. Карпеев
K. S. Nazarov, I. V. Glazyrin, A. V. Karpeev

Российский федеральный ядерный центр – ВНИИ технической физики им. акад. Е. И. Забабахина
Russian Federal Nuclear Center – E. I. Zababakhin Institute of Technical Physics

С использованием трёхмерного МГД кода ФОКУС сравнивались характеристики лайнеров для цилиндрической и квазисферической геометрий – рост МГД-неустойчивостей и форма плазмы на момент максимального сжатия. Параметры лайнера и тока генератора были выбраны для условий экспериментов на установке Ангара-5. Проанализирована роль внешнего магнитного поля в развитии неустойчивостей. Определены отличия двумерного сжатия от трёхмерного. Показано, что квазисферический лайнер является более неустойчивым по сравнению с цилиндрическим, однако позволяет сформировать на оси компактную плотную горячую плазму.

The liners characteristics such as growth of MHD instabilities and plasma shape at the moment of maximal compression in cylindrical and quasi-spherical geometries are compared using three-dimensional MHD code FOCUS. Parameters of the liner and generator current are taken for conditions of Angara-5 facility. The role of an external magnetic field in the instabilities development is analyzed. Differences between two-dimensional and three-dimensional compression are found. It is shown, that quasi-spherical liner is more unstable in comparison with the cylindrical one. Such sort of liners enables to generate compact hot dense plasma on the axis.

Плазма Z-пинча – один из самых мощных источников рентгеновского излучения, которое может быть создано в лабораторных условиях в настоящее время. Такое излучение может широко применяться для различных целей: ICF, астрофизические исследования в лабораторных условиях, физика высоких плотностей энергии (HEDP). Эксперименты на таких больших установках как АНГАРА-5 (Россия), QiangGuang-1 (Китай) и Z/ZR-машина (США) показали, что сжатие плазмы магнитным полем в Z-пинче может быть одним из способов достижения температур и плотностей, необходимых для начала термоядерной реакции.

И на установке Ангара-5 (рис. 1, слева), и на установке QiangGuang-1 (рис. 1, справа), проводятся эксперименты по сжатию квазисферических лайнеров. Считается, что такие формы позволяют значительно повысить, по сравнению с традиционными цилиндрическими лайнерами, плотности потока излучения на конечной стадии сжатия. И не безосновательно. В работе [1] впервые экспериментально зарегистрировано увеличение плотности потока энергии мягкого рентгеновского из-

лучения и концентрации ионов плазмы при сжатии пинча в центре квазисферических проволочных лайнеров.

Основной преградой на пути достижения высокой плотности вещества на финальной стадии сжатия и высокой выходной мощности рентгеновского излучения является экспоненциальный рост амплитуды возмущений из-за МГД-неустойчивостей в ходе сжатия Z-пинча. В последние годы проводится большое количество экспериментальных и численных исследований выбора наилучшей конфигурации для обеспечения устойчивого сжатия Z-пинчей, подробный список работ приведен в обзоре [3]. В 2010 году на Z-машине в Сандии проведены первые управляемые эксперименты по измерению скорости развития МГД-неустойчивостей с высоким пространственно-временным разрешением (рисунок 2). Результаты таких экспериментов очень важны и для проверки существующих и для создания новых теоретических моделей, а также для верификации расчетных кодов.

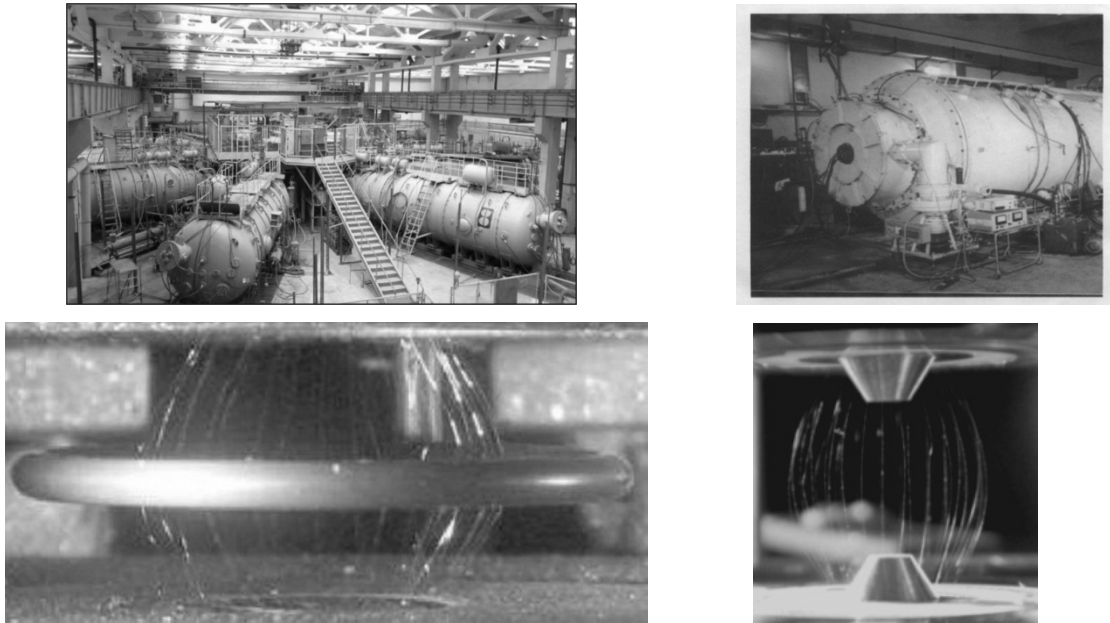


Рис. 1. Внешний вид установок (сверху), на которых проводятся исследования по сжатию квазисферических лайнеров (снизу). Слева АНГАРА-5 (Россия, $I_{\max} = 3,5$ МА) [1], справа QiangGuang-1 (Китай, $I_{\max} = 1,5$ МА) [2]

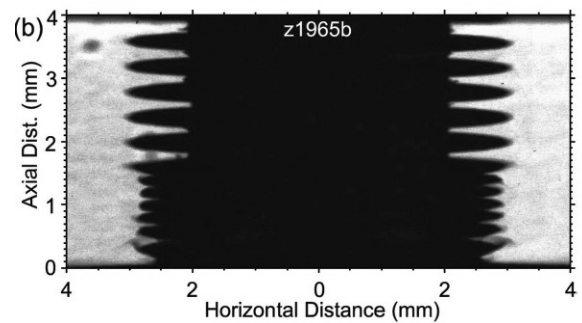
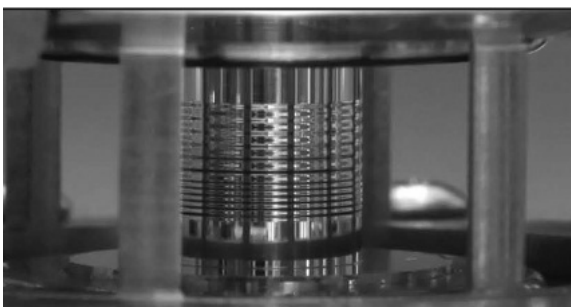


Рис. 2. Слева – внешний вид лайнера с заданными возмущениями в управляемых экспериментах на Z-машине (Сандия, США) [4], справа – экспериментальное изображение полученных возмущений высокого разрешения

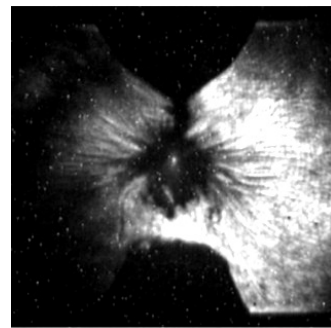
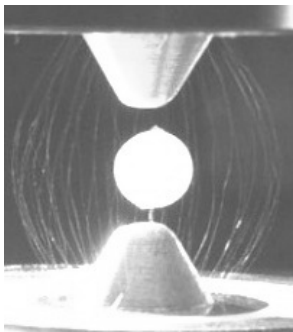


Рис. 3. Экспериментальные изображения развития неустойчивостей при сжатии квазисферических лайнеров на установке QiangGuang-1 [2]

Переход к сжатию лайнеров квазисферической формы ни в коей мере не решает проблемы неустойчивостей. Результаты экспериментов по сжатию таких лайнеров на установке QiangGuang-1 [2], демонстрируют наличие неустойчивостей и в

случае квазисферического сжатия (рис. 3, справа). Численное исследование влияния формы сжимаемого лайнера на развитие возмущений было проведено по программе [5].

Для сравнения скорости роста возмущений в цилиндрическом и квазисферическом случаях была сформулирована модельная задача, параметры которой аппроксимируют значения, получаемые на установке Ангара-5.

В декартовой области размером $2 \times 2 \times 2$ см, заполненной воздухом с плотностью 5 мкг/см^3 , располагается осесимметричный Al лайнер плотностью 500 мкг/см^3 – см. рис. 4. В цилиндрических координатах область, занятая лайнером, задается следующим образом: $\rho_L \leq \rho \leq \rho_R$, где $\rho_L = 7 \text{ мм}$,

$$\rho = \sqrt{\frac{r^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2}}, \quad \rho_R = \rho_L + \delta + a_0 \left[\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}\varphi\right) + \xi \right],$$

$\delta = 2 \text{ мм}$ – толщина лайнера, $\lambda = 1 \text{ мм}$ – длина волны возмущения, $a_0 = 100 \text{ мкм}$ амплитуда возмущения, ξ – случайная величина, равномерно распределенная в интервале $[-\xi_0, \xi_0]$, ξ_0 – задан-

ная доля a_0 . Дополнительное случайное возмущение имитирует шероховатости поверхности. Форма лайнера определяется отношением радиусов $a = 0,7 \text{ мм}$ и b . При $b = 200 \text{ см}$ – лайнер цилиндрический, при $b = 2 \text{ мм}$ – квазисферический.

В течение временного промежутка $\tau = 100 \text{ нсек}$ через лайнер пропускается ток силой

$$I = I_{\max} \cdot \sin^2\left(\frac{\pi t}{2\tau}\right), \quad I_{\max} = 3,5 \text{ МА.}$$

Начальное распределение концентраций воздуха и алюминия показано на рис. 4.

На рис. 5 на один и тот же момент времени представлены характерные двумерные сечения пространственного распределения концентраций веществ лайнера для цилиндрического (слева) и квазисферического (в центре) случаев. Для корректного сравнения амплитуд возмущения используется вспомогательная эллиптическая сетка (рис. 5 справа), внутренняя эллиптическая поверх-

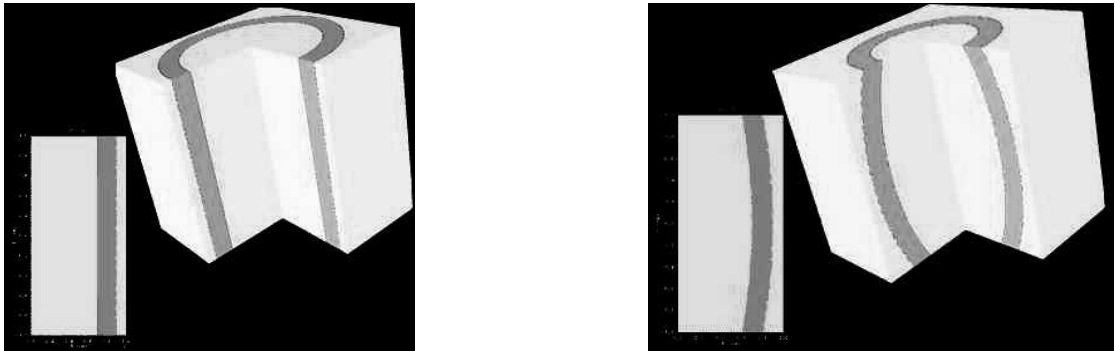


Рис. 4. Начальное распределение веществ. Серым цветом показан лайнер, белым – воздух. Слева – цилиндрический лайнер, справа – квазисферический

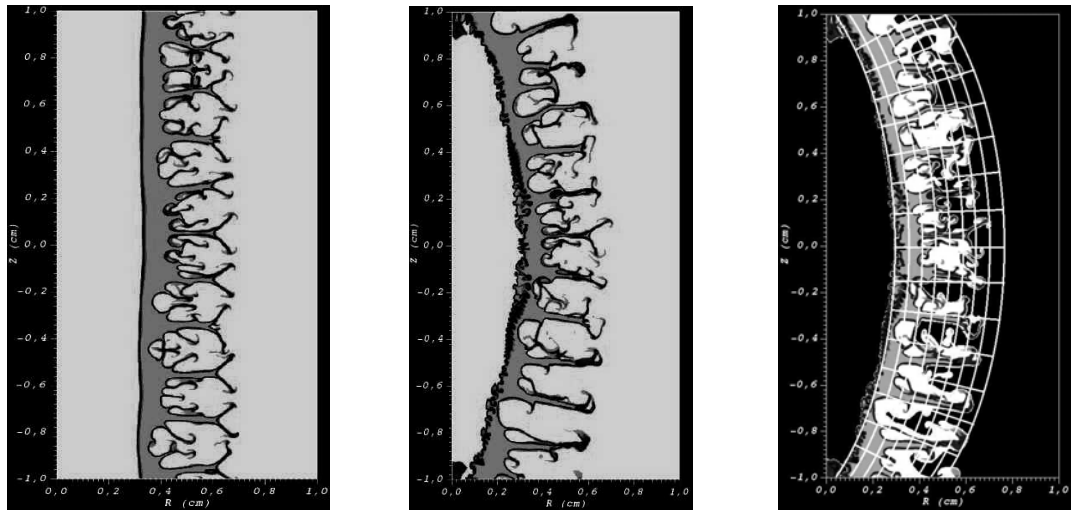


Рис. 5. Характерное распределение веществ. Слева – цилиндрический лайнер, в центре – квазисферический, справа вспомогательная эллиптическая сетка для сравнения результатов сжатия

ность которой аппроксимирует внутреннюю поверхность лайнера. После этого строится регулярная ортогональная сетка, одно семейство поверхностей которой получено параллельным переносом построенной поверхности, второе – ортогональное дополнение к первому. Следующим шагом выполняется проекция полученного решения на построенную сетку. Разница между максимальной и минимальной радиальными координатами ячеек с концентрацией вещества лайнера выше 1 % определяет амплитуду возмущения.

На рис. 6 слева представлены зависимости амплитуд возмущений от времени, полученные при помощи описанной выше процедуры вычисления. Проводилось сравнение двумерных расчетов для цилиндрического и квазисферического случаев и трехмерных расчетов для цилиндриче-

ского и квазисферического случаев соответственно. Сравнение показало, что:

- в квазисферическом случае амплитуды возмущений растут быстрее,
- по рассматриваемому критерию оценки двумерные расчеты дают слегка заниженные результаты относительно трехмерных.

На рис. 6 справа представлено распределение средней плотности плазмы отнесенной к максимальному значению как функция от координаты z (вдоль оси симметрии) внутри цилиндра радиусом 0,1 мм. Линия красного цвета – цилиндрический лайнер, синяя линия – квазисферический. Сравнение областей сжатия показывает, что в квазисферическом случае масса такой области меньше ($m_{sph} = 0,946 \cdot m_{cyl}$). При этом, в квазисферическом

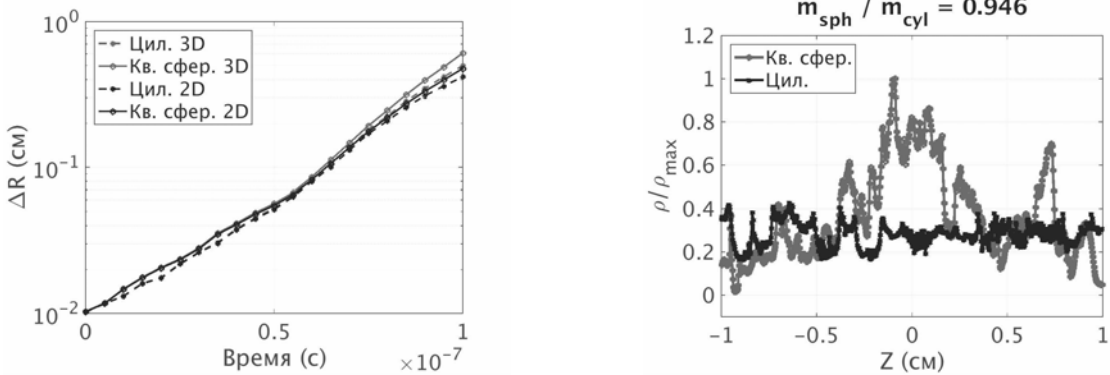


Рис. 6. Слева – зависимость от времени амплитуды возмущений в двумерных и трехмерных расчетах; справа – распределение вдоль координаты z средней плотности плазмы, отнесенной к максимальному значению, внутри цилиндра радиусом 0,1 мм

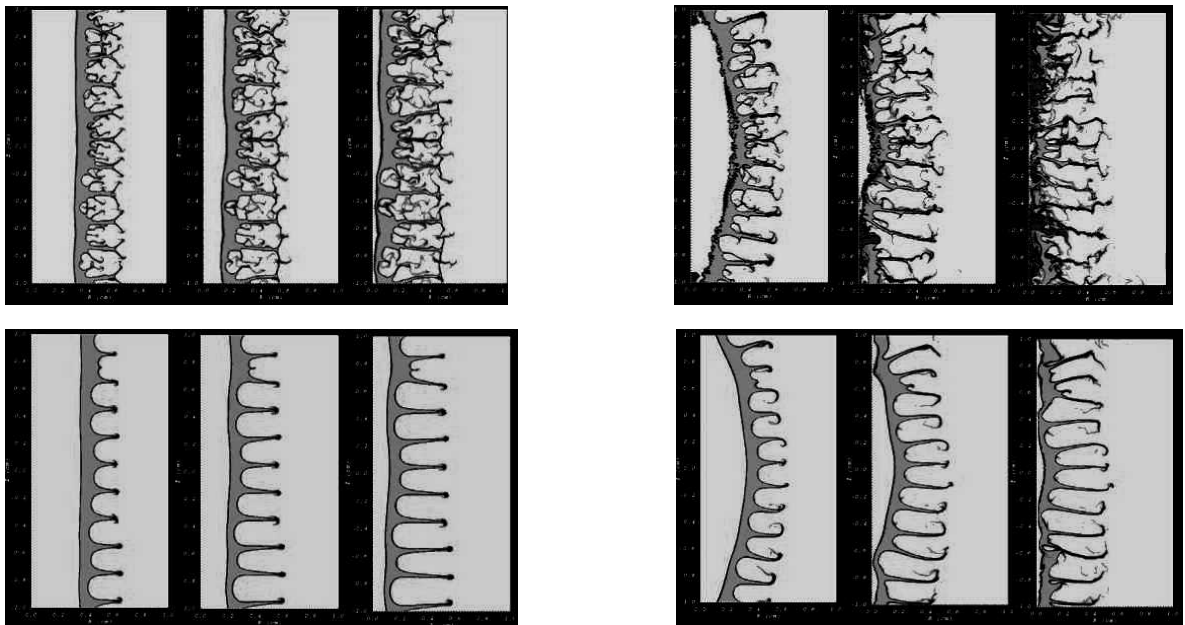


Рис. 7. Распределения вещества лайнера для цилиндрического (слева) и квазисферического случаев на три момента времени (слева направо): 90, 100 и 110 нсек. Сверху – без внешнего магнитного поля, снизу – с магнитным полем

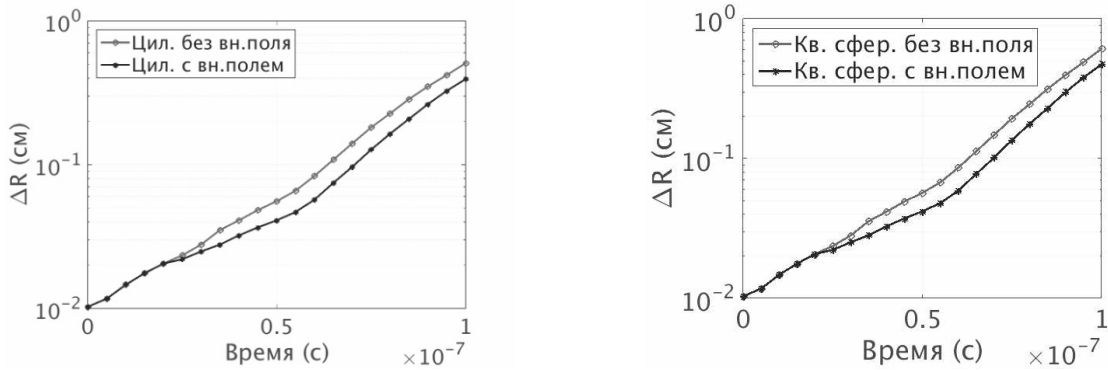


Рис. 8. Зависимости от времени амплитуды возмущений в расчетах с внешним магнитным полем (черная кривая) и без внешнего поля (серая кривая). Слева – цилиндрический лайнер, справа – квазисферический

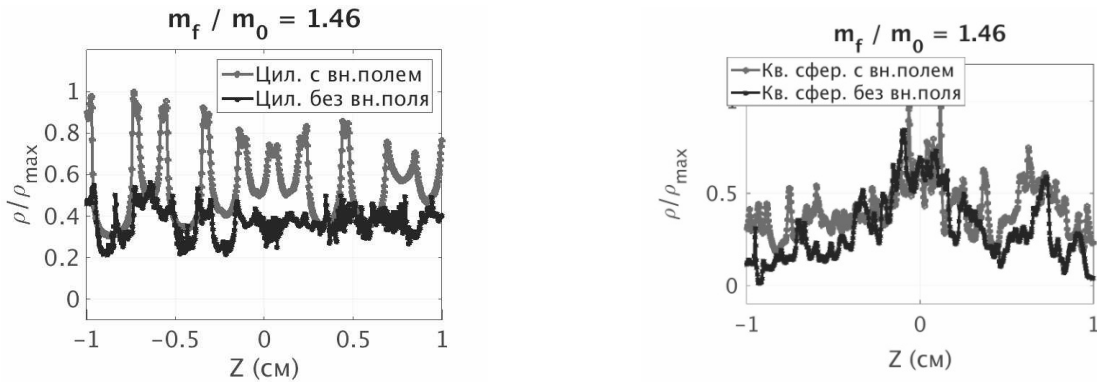


Рис. 9. Распределение массы вдоль оси симметрии лайнера в расчетах с внешним магнитным полем (серая кривая) и без внешнего поля (черная кривая). Слева – цилиндрический лайнер, справа – квазисферический

случае, в центральной части образуется область с повышенной плотностью, которая является источником повышенной плотности излучения.

В работе Шафранова [6] показано, что для слоя плазмы конечной толщины происходит стабилизация локальных мод МГД неустойчивости если для азимутального B_ϕ и аксиального B_z магнитных полей, в конфигурации лайнера, выполняется соотношение $B_z > B_\phi \sqrt{2}$. С целью проверки данного утверждения, проведена вторая серия расчетов, полностью повторяющая первую, за одним лишь исключением – во всей области задано начальной аксиальное поле в 10 кГс. На рис. 7 представлены пространственные распределения вещества лайнера для цилиндрического (слева) и квазисферического (справа) случаев на три достаточно поздних момента времени: 90, 100 и 110 нсек. Можно видеть, что в случае с магнитным полем (нижняя строка), как и ожидалось, произошло подавление коротковолновых возмущений, стабилизация внутренней поверхности лайнера.

На рис. 8 представлено сравнение зависимостей амплитуд возмущений от времени в расчетах сжатия с внешним полем (серые кривые) и без него (черные кривые). Слева представлены результаты расчетов цилиндрических лайнеров, справа – квазисферических. В обоих случаях присутствие внешнего магнитного поля сдерживает рост амплитуды возмущений.

На рис. 9 показаны распределения средней плотности плазмы отнесенной к максимальному значению как функции от координаты z (координаты вдоль оси симметрии) внутри цилиндра радиусом 0,1 мм на момент максимального сжатия. Серые кривые соответствуют расчету с полем, черные кривые – без поля. Слева представлены результаты расчетов цилиндрических лайнеров, справа – квазисферических. В обеих конфигурациях лайнера магнитное поле позволяет существенно увеличить массу сжатого вещества (примерно на 40 %).

Численное моделирование показало, что в квазисферическом случае амплитуды возмущений растут быстрее, при этом уменьшается масса сжатого вещества, но, в то же самое время, в центре

имеется локальная область с повышенной плотностью вещества. Наличие внешнего аксиального магнитного поля позволяет слегка замедлить развитие неустойчивости, подавить коротковолновые возмущения, увеличить массу сжатого вещества. Результаты двумерных расчетов дают слегка заниженную оценку скорости роста амплитуд возмущений по сравнению с результатами трехмерных расчетов.

Список литературы

1. Smirnov V. P., Grabovskii E. V., Zakharov S. V. // *Nukleonika*. 2012. Vol. 57 (2). P. 2012.
2. Ning Ding and et al. // in Proc. of 12th ZST-conference. - Snezhinsk{2014}.
3. Haines M. G. A review of the dense Z-pinch. // *Plasma Phys. Control. Fusion*. 2011. Vol. 53. P. 093001.
4. Sinars D. B., Peterson K. J., Slutz S. A et al. // *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011. 39. P. 2408.
5. Karpeev A. V. A block-structured adaptive mesh implemented in the code Focus // *Proceedings of XI International Conference «Supercomputing and Mathematical Modeling»*. Sarov, 2009. P. 74.
6. Шафранов В. Д. Об устойчивости плазменного шнура при наличии продольного магнитного поля и проводящего кожуха. / В сб.: *Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций* // Т. 2. М.: Изд-во АН СССР, 1958. С. 130–144.