

УДК 533.9.07:533.9.15

# Высокие плотности энергии и магнитное обжатие

С. Ф. Гаранин

*Подход МАГО/МТФ предполагает предварительный нагрев замагниченной ДТ-плазмы до температур 0,2–0,4 кэВ и последующее адиабатическое сжатие плазмы лайнером с целью достижения зажигания термоядерных реакций. Уровень плотностей энергии, который необходимо достичь при таком сжатии, соответствует давлениям в десятки мегабар.*

*Для своего развития система МАГО должна опираться на результаты исследований в разных областях физики высоких плотностей энергии. С другой стороны, сами исследования в рамках системы МАГО обогащают разделы физики высоких плотностей энергии и дают новые методы исследований.*

## Введение

Область исследований, известная как МАГО (аббревиатура от МАГнитное Обжатие) в России и как МТФ (синтез замагниченных мишеней) в США, является альтернативой основным подходам управляемого термоядерного синтеза (системам с магнитным удержанием и инерциальному термоядерному синтезу – ИТС). В отличие от прямого гидродинамического сжатия первоначально холодного топлива (как в ИТС) подход МАГО/МТФ [1–5] состоит из двух стадий:

1) вначале создается замагниченная горячая плазма, пригодная для последующего сжатия (с магнитным полем  $\sim 0,1$  МГс, имеющим замкнутую конфигурацию силовых линий, с плотностью  $\sim 10^{18}$  см $^{-3}$ , температурой  $\sim 300$  эВ и достаточно малым содержанием примесей, поскольку они могут увеличивать потери на излучение);

2) затем с помощью мощных драйверов (например, взрывомагнитных генераторов – ВМГ) производится квазиадиабатическое сжатие плазмы лайнерами (со скоростями порядка 1 см/мкс) и доведение ее до параметров, соответствующих выполнению критерия Лоусона.

Общая схема системы МАГО представлена на рис. 1.

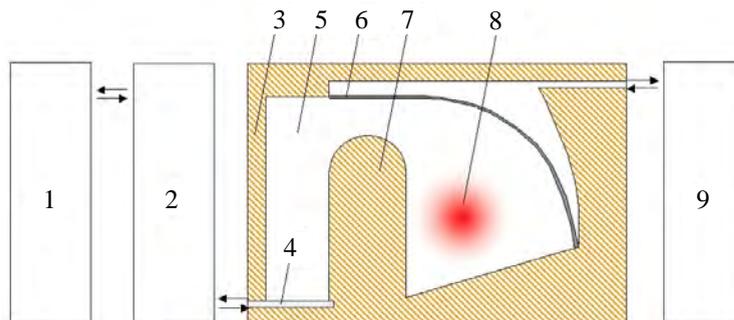


Рис. 1. Схема сжатия плазмы МАГО: 1 – быстрый спиральный ВМГ, 2 – узел формирования импульса тока, 3 – катод, 4 – изолятор, 5 – камера МАГО, 6 – лайнер для сжатия плазмы, 7 – анод, 8 – предварительно нагретая замагниченная плазма, 9 – мощный дисковый ВМГ

### *Основные характеристики и высокие плотности энергии в системе МАГО*

В РФЯЦ-ВНИИЭФ был предложен способ получения термоядерной замагниченной плазмы с помощью специальной плазменной камеры МАГО [1, 3]. В экспериментах с запиткой камеры МАГО от ВМГ мегаджоулевого диапазона получена плазма с килоэлектронвольтными температурами при нейтронном выходе до  $(4-5) \cdot 10^{13}$  в импульсе.

Камера МАГО состоит из двух тороидальных отсеков, соединенных узким кольцевым соплом (см. рис. 1). Камера заполняется малоплотным газом (дейтерием или ДТ-газом). Предполагается, что создано начальное азимутальное магнитное поле.

При включении основного, сравнительно быстрого источника тока плазма под действием нарастающего магнитного поля перетекает через сопло из первого отсека во второй и нагревается в процессе торможения за счет различных механизмов, которые переводят большую часть магнитной энергии в тепловую энергию плазмы.

Основываясь на результатах экспериментов и расчетов, можно сделать вывод, что в камере МАГО в объеме  $\sim 1-3$  л получена ДТ-плазма со следующими характерными параметрами:

плотность	$\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ,
температура	$\sim 300 \text{ эВ}$ ,
магнитное поле	$\sim 0,2 \text{ МГц}$ ,
нейтронный выход	до $(4-5) \cdot 10^{13}$ .

Согласно [1, 3] для достаточно чистой плазмы зажигание можно получить, используя систему сжатия с энергией лайнера  $\sim 20$  МДж и скоростью лайнера  $\sim 1$  см/мкс. В совместном российско-американском (ВНИИЭФ–ЛАНЛ) эксперименте HEL-1 был получен лайнер с близкими параметрами: энергия  $\sim 25$  МДж, скорость  $\sim 0,8$  см/мкс [6].

В одномерном квазисферическом расчете сжатия плазмы МАГО твердотельным лайнером с параметрами, характерными для эксперимента HEL-1, получены следующие интегральные характеристики плазмы при сжатии:

максимальная внутренняя энергия	3,1 МДж,
плотность ДТ-плазмы	$3,9 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ,
плотность энергии	$2 \text{ МДж/см}^3$ ,
нейтронный выход	$3 \cdot 10^{18}$ ,
термоядерное энерговыделение	8,9 МДж.

ДТ-плазма в камере МАГО пригодна для зажигания при ее квазисферическом сжатии, если она живет 5–10 мкс. Однако полученные в настоящее время в экспериментах данные говорят о времени жизни плазмы  $\sim 2-3$  мкс .

### *Синтез с замагниченной мишенью (MTF), использующий конфигурацию с обращенным полем (FRC)*

FRC содержит полоидальное магнитное поле с замкнутыми силовыми линиями внутри цилиндрически симметричной плазмы и разомкнутыми силовыми линиями между плазмой и удерживающей стенкой (рис. 2, см. также цв. вкл.). Такая конфигурация создается в разряде типа тетапинча и имеет ряд преимуществ. Одно из них состоит в том, что  $\beta$  (отношение теплового давления к магнитному) плазмы сравнительно велико, и время жизни плазмы может составлять много альфвеновских времен, хотя причины этого не вполне ясны. Другим преимуществом является то, что при радиальном сжатии эффективное натяжение магнитных силовых линий будет вызывать также аксиальное сжатие плазмы.

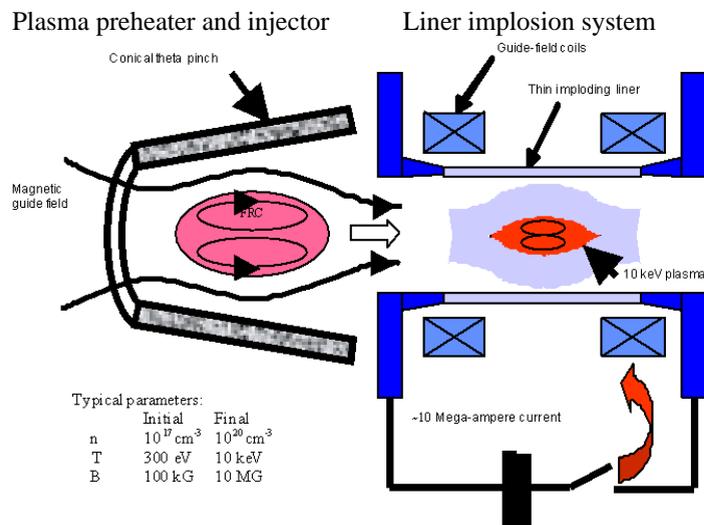


Рис. 2. Формирование и сжатие FRC как мишени MTF [7]

Несколько американских лабораторий (включая Военно-воздушную лабораторию, ЛАНЛ и др.) совместно работают над демонстрационным экспериментом по сжатию FRC твердотельным лайнером [7–9]. Основной источник энергии – батарея Shiva Star. В экспериментах получена FRC с плотностью  $\sim 0,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , температурой 200–300 эВ, магнитным полем  $\sim 6 \text{ кГс}$ , размером  $\sim 2 \text{ см}$  и временем жизни 7–9 мкс. Экспериментально исследован алюминиевый лайнер, предлагаемый для сжатия плазмы. В этих экспериментах лайнер, разгоняемый током  $\sim 11 \text{ МА}$  с временем нарастания 10 мкс, достиг скорости 4 км/с (плотность энергии  $\sim 0,02 \text{ МДж/см}^3$ ) и радиального сжатия (степени схождения по радиусу) 11 при хорошей симметрии. Проведены эксперименты по транспортировке, инжекции и захвату FRC. Выполнен первый эксперимент по инжекции и сжатию FRC лайнером [10]. Получены первые нейтроны ( $\sim 10^8$ ) при сжатии.

### ***Применение методов подхода МАГО/MTF для исследований в области физики высоких плотностей энергии***

Как видно, для различных систем МАГО/MTF характерны высокие плотности энергии. Это позволяет использовать знания и методы, полученные и развитые при разработке этих систем, для различных задач физики высоких плотностей энергии. В числе таких задач – исследование динамических свойств материалов [11] (уравнений состояния, динамической прочности и др.), исследование поверхностных разрядов в сильных магнитных полях (включая разряды на поверхности изолятора и взаимодействие магнитных полей с поверхностью металла), исследование гидродинамических и магнитогидродинамических неустойчивостей, изучение поведения гидродинамических и магнитогидродинамических течений для калибровки численных методик, а также рассмотрение новых областей физики высоких плотностей энергии, таких как механизмы нагрева плазмы с помощью бесстолкновительных ударных волн, аномального нагрева в приэлектродных плазменных течениях, двумерного турбулентного вязкого нагрева и т. д. Кратко рассмотрим некоторые из этих задач.

## 1. Проведение экспериментов терапаскального уровня по исследованию уравнений состояния с помощью лайнера системы МАГО

Мощные ВМГ и энергичные лайнеры, разработанные для системы МАГО, а также опыт, полученный при экспериментальном и расчетно-теоретическом изучении лайнерной физики в экспериментах МАГО, можно использовать для исследования уравнений состояния в области высоких плотностей энергии. В настоящее время ЛАНЛ и РФЯЦ-ВНИИЭФ сотрудничают [12] в рамках подготовки эксперимента (рис. 3, см. также цв. вкл.) терапаскального уровня по исследованию уравнений состояния с помощью лайнера, разгоняемого 60 МА током дискового ВМГ. Эксперимент основан на использовании сильных (~6 МГс) магнитных полей, разгоняющих конденсированные лайнеры до скоростей ~20 км/с, превышающих достижимые при прямом использовании ВВ или в газовых пушках.

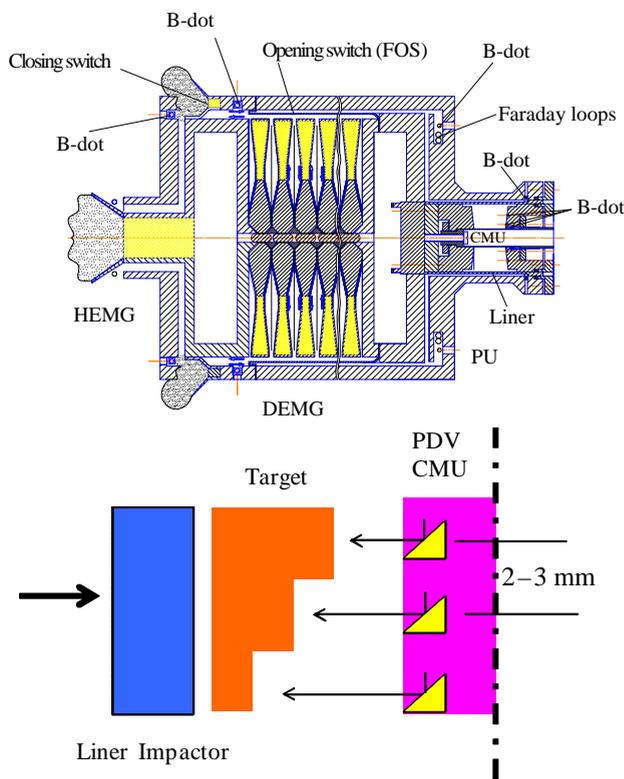


Рис. 3. Схема проведения эксперимента по измерению ударных адиабат [12]

Ожидается, что в эксперименте будут использоваться датчики PDV, размещенные в центральном измерительном узле, для измерения эффективности лайнера как ударника (скорости и синхронности соударения с мишенью) и предварительных ударно-волновых измерений при давлениях ~1 ТПа в нескольких образцах материалов.

Для экспериментов с дисковым ВМГ проведены двумерные расчеты движения лайнера с линейной массой ~20 г/см, разгоняемого до скорости 20 км/с. Удалось подобрать форму торцевых медных стенок, которая обеспечивает (рис. 4, см. также цв. вкл.) удовлетворительную форму внутренней поверхности алюминиевого лайнера перед соударением с мишенью диаметром 2 см.

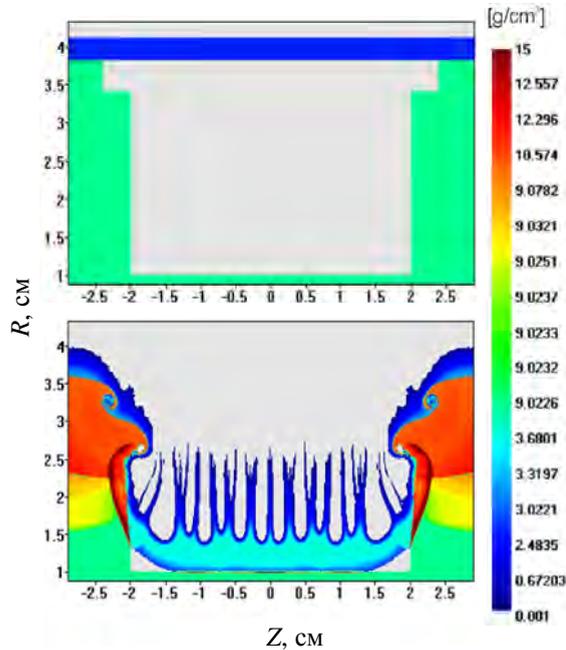


Рис. 4. Импульсия лайнера, взаимодействующего с медными стенками: распределение плотности (расчет по методике МИД)

## 2. Поверхностные разряды в сильных магнитных полях

При переходе магнитного потока из одной среды в другую могут возникать поверхностные разряды [13]. Если магнитный поток переходит в плазму или изолятор из вакуума (или малоплотной плазмы), такой разряд называется Н-прижатым. Разряд, возникающий при выходе магнитного потока из изолятора, называется Н-отжатым. Для разрядов, возникающих в сильных полях систем МАГО-МТФ, характерны высокие плотности энергии  $\sim B^2/8\pi$ .

В качестве примеров Н-прижатых разрядов можно привести вакуумный Н-прижатый разряд на поверхности изолятора (рис. 5) и диффузию мегагауссных полей в металл (см. раздел 2.1).

При передаче магнитного потока через поверхность изолятора на ней может возникать пробой, ограничивающий поток энергии, поставляемый через поверхность (Н-отжатый разряд). В этом разряде возникает существенное гидродинамическое движение, выносящее магнитный поток вместе с веществом от поверхности. Часть джоулевого тепла, выделяющегося в разряде, переносится излучением или теплопроводностью к изолятору и превращает его поверхностные слои в плазму. Скорость вытекающей из разряда плазмы, а также ее плотность и температура зависят от величины магнитных полей в неиспаренном изоляторе и на выходе из токового слоя. При этом существует предельная скорость улетающих от изолятора ионизованных паров

$$v_{1\max} = 17 \left( B^2 / 8\pi \right)^{0,156}$$

$v_{1\max}$  – см/мкс, магнитное поле  $B$  на входе в разряд – в МГс.

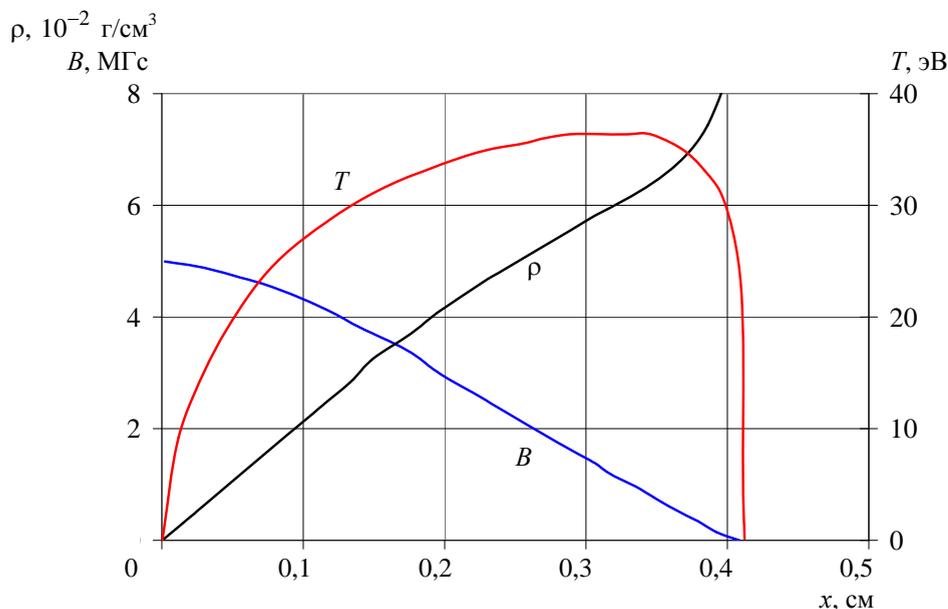


Рис. 5. Профили температуры  $T$ , плотности  $\rho$  и магнитного поля  $B$  для диффузии магнитного поля (5 МГс) в изолятор (плексиглас) на время 1 мкс

Происходящее в разряде испарение изолятора и наличие ионизованных паров, движущихся вместе с магнитными силовыми линиями, может быть вредным, если поставляемый через поверхность магнитный поток используется для разгона лайнеров или плазмы. В первом случае дополнительная масса паров будет утяжелять лайнер и уменьшать его ускорение, а во втором случае пары могут загрязнять плазму примесями изолятора, что имеет существенное значение для подходов, использующих чистую водородную плазму, таких как МАГО и плазменный фокус.

Физику поверхностных разрядов в сильных магнитных полях можно считать отдельным разделом физики высоких плотностей энергии. Знания и методы изучения этих разрядов, приобретенные при разработке системы МАГО, можно использовать для решения различных задач и, конечно, для дальнейшего исследования поверхностных разрядов.

### 2.1. Поведение толстых алюминиевых проволочек при воздействии мегамперного тока

В Университете Невады, Рино (UNR, Рино, США) при теоретической поддержке РФЯЦ-ВНИИЭФ, проведены экспериментальные исследования [14] взаимодействия мегагауссных магнитных полей с поверхностью металла с использованием простых геометрий (в виде проволочек, нагружаемых магнитными полями). Эта работа проводится в интересах систем МАГО-МТФ, для которых велика роль поверхностных разрядов в сильных магнитных полях. В этих экспериментах ток  $\sim 1$  МА с временем нарастания около 100 нс пропусклся через «толстые» проволочки диаметром от 0,5 до 2 мм, т. е. проволочки с радиусом больше толщины скин-слоя. Численное моделирование [15] экспериментов показало, что в расчетах (в согласии с экспериментом) при полях  $> 2$  МГс на поверхности металла образуется плазма с температурами выше 10 эВ (рис. 6).

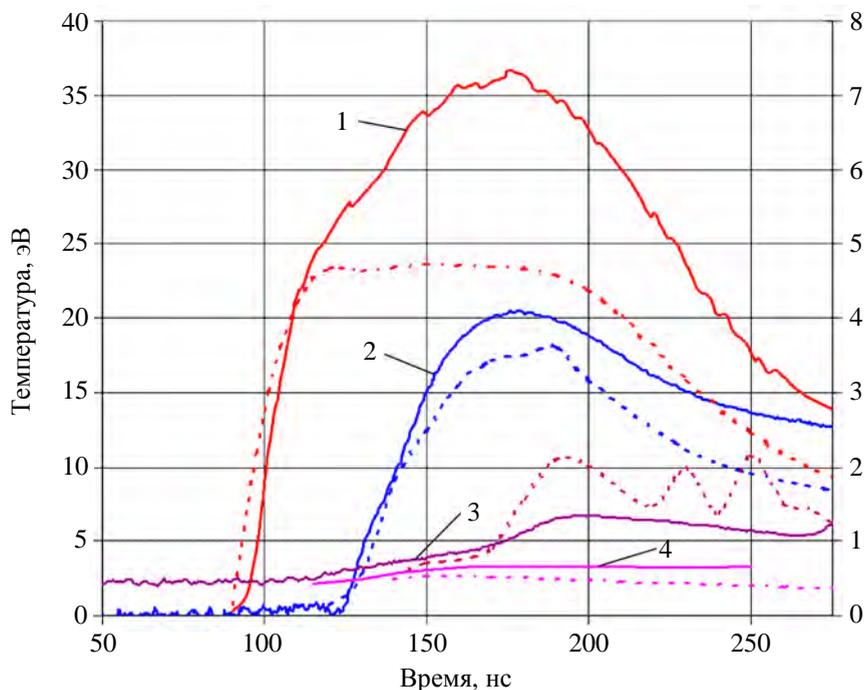


Рис. 6. Экспериментальные (сплошные линии) и расчетные (пунктир) яркостные температуры поверхности проволоочек в зависимости от времени. Диаметр проволоочек: 1 – 0,5 мм; 2 – 1 мм; 3 – 1,6 мм; 4 – 2 мм. Данные для 1,6 и 2 мм проволоочек представлены на правой оси

## 2.2. Использование простых геометрий (проволочек или фольг, нагружаемых мегаамперными токами) для исследования свойств теплового плотного вещества

Исследования взаимодействия мегагауссных магнитных полей с поверхностью металла с помощью простых геометрий (в виде проволоочек, нагружаемых мегаамперными токами, или фольг, нагружаемых мегагауссными магнитными полями) в принципе дают возможность исследования свойств (уравнений состояния, кинетических коэффициентов, непрозрачностей) теплового плотного вещества (ТПВ) ( $T \sim 1-10$  эВ, плотность порядка твердотельной) [11]. Простая геометрия проволоочек может образовывать очень однородные колонки ТПВ (рис. 7, см. также цв. вкл.), однако измерения его характеристик затруднены горячей плазмой на поверхности. Использование в этой геометрии больших токов ( $\sim 5$  МА), получаемых с помощью ВМГ, также дает однородные колонки ТПВ, однако их шунтирование горячей плазмой на поверхности оказывается еще более значительным, чем для мегаамперного тока, используемого в экспериментах UNR.

Для получения теплового плотного вещества с большими возможностями для диагностики плазмы можно использовать электровзрыв металлической фольги, зажатой между двумя цилиндрическими слоями изолятора. Через фольгу протекает ток от спирального ВМГ с узлом разрыва. Фольга расположена на наружном радиусе нагрузки, что может облегчить проведение измерений параметров плазмы. Физическая схема нагрузки в предлагаемом эксперименте приведена на рис. 8.

Как показывают расчеты (рис. 9, см. также цв. вкл.), в такой системе при взрыве медной и алюминиевой фольг можно создать ТПВ с плотностью  $> 0,01$  г/см<sup>3</sup>, температурой  $\sim 2-3$  эВ

и достаточно однородным распределением величин по сечению фольги. Нагрев окружающего изолятора не приводит к большому отвлечению тока в разряд по изолятору. Система дает возможность диагностики таких параметров ТПВ, как проводимость, давление и внутренняя энергия, по результатам электротехнических измерений и измерений скорости движения границ взрывающейся фольги.

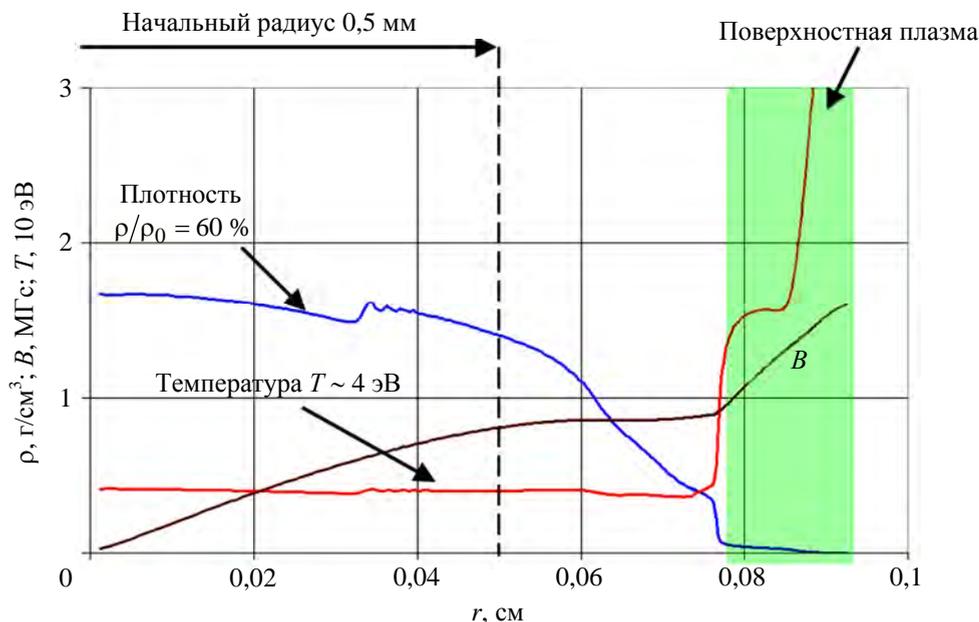


Рис. 7. Профили плотности, магнитного поля и температуры при взрыве алюминиевой проволоки диаметром 1 мм под действием мегаамперного тока на момент времени  $t = 200$  нс

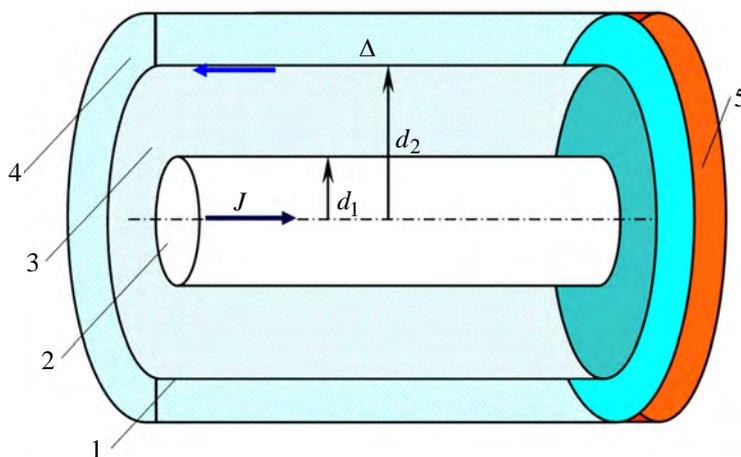


Рис. 8. Физическая схема нагрузки: 1 – фольга; 2 – центральный стержень; 3, 4 – цилиндры из диэлектрика; 5 – торцевой фланец

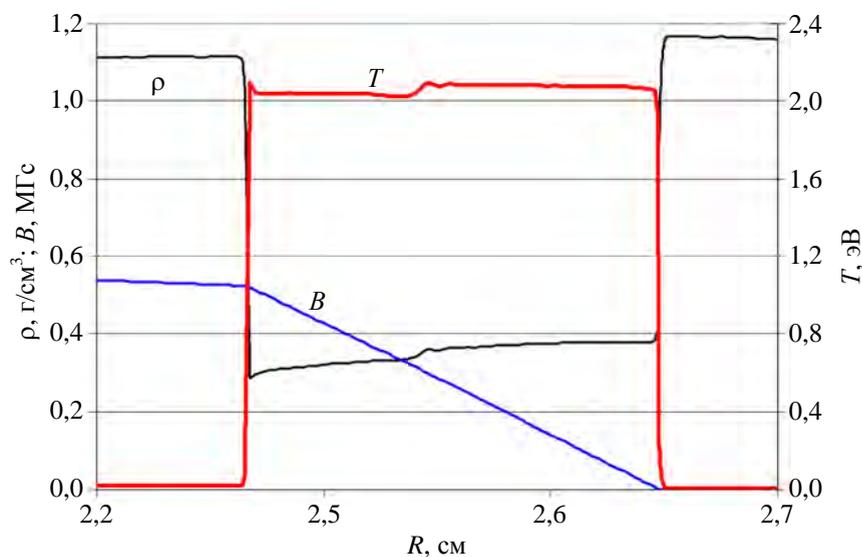


Рис. 9. Распределения магнитогидродинамических величин по сечению взорванной алюминиевой фольги,  $t = 5,5$  мкс

### 3. Исследование гидродинамических и магнитогидродинамических неустойчивостей при высоких плотностях энергии

Исследование физики лайнеров, которые являются существенным элементом системы МАГО, показывает, что изучение их движения можно использовать для исследования гидродинамических и магнитогидродинамических неустойчивостей. Вопросы устойчивости при наличии прочности материала являются достаточно тонкими и чувствительно зависят от условий и параметров разгона лайнеров. Так, например, на установке Shiva Star (эксперименты NTLX) и Atlas (эксперименты HF и LD) были проведены схожие по условиям эксперименты [16, 17]: начальные радиусы лайнеров одинаковы, а толщины лайнеров, максимальные токи и характерные времена изменения токов – близки. Однако рентгенограммы этих лайнеров показали для экспериментов NTLX и HF довольно умеренное или слабое развитие неустойчивости, а для эксперимента LD – очень сильное (рис. 10, см. также цв. вкл.).

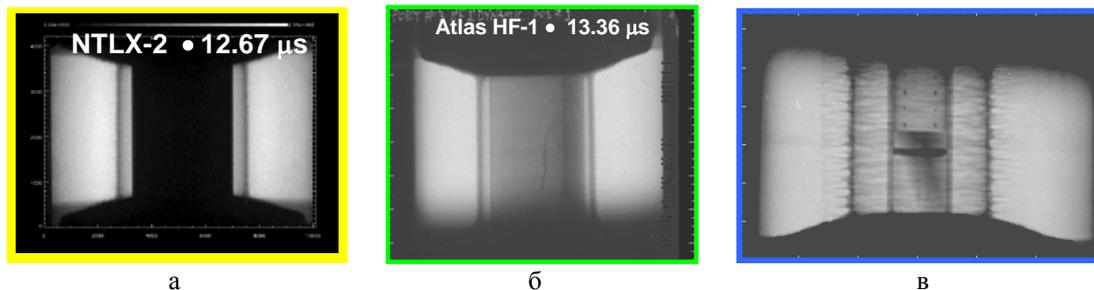


Рис. 10. Радиографические изображения в экспериментах NTLX (а), HF (б), LD (в)

Хотя расчетное моделирование такого тонкого отличия в экспериментах было трудной задачей, результаты тщательных двумерных расчетов [18] показали, что и в расчетах NTLX и HF неустойчивости развивались довольно умеренно, а в расчете LD очень сильно (рис. 11, см. также цв. вкл.).

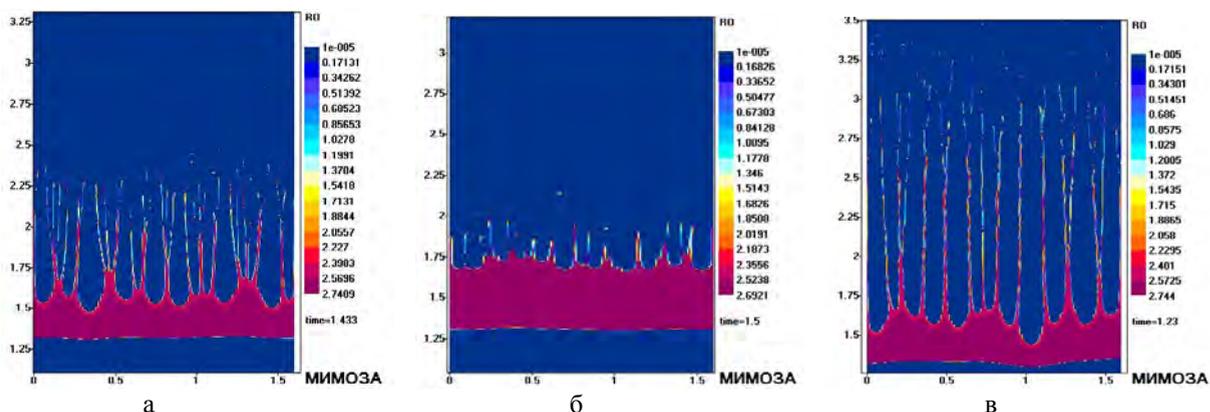


Рис. 11. Распределения плотности лайнера, полученные в расчетах NTLX (а), HF (б) и LD (в)

#### 4. Механизмы нагрева плазмы (новые области исследований физики высоких плотностей энергии)

При разработке системы МАГО был обнаружен ряд эффектов, приводящих к нагреву плазмы, которые могут представлять интерес для других областей физики высоких плотностей энергии и иметь приложения в разных областях науки и техники. Примерами такого рода эффектов могут служить:

- поперечные ударные волны, состояние плазмы за фронтом которых зависит от процессов на фронте волны. Среди них можно выделить: 1) ионизирующие ударные волны [19], в которых вмороженность магнитного поля в вещество определяется процессами в окружающей плазме (воздействие излучения со стороны окружающей плазмы) и на фронте; и 2) бесстолкновительные ударные волны [20], состояние плазмы в которых определяется бесстолкновительной кинетикой на фронте волны, для них характерно зависящее от числа Маха соотношение электронных и ионных температур за фронтом и немаксвелловское распределение ионов;

- приэлектродный аномальный вязкий нагрев [21]. При ускорении плазмы магнитным полем она разрежается вблизи анода из-за эффекта Холла, что в результате действия лоренцевой силы приводит к ее дополнительному ускорению. Учет столкновений плазмы со стенкой приводит к неустойчивости движения струи плазмы и ее повороту в сторону анода [22]. В результате высокоскоростная ионная струя сталкивается со стенкой, что приводит к нагреву ионов до высоких температур. Поскольку эта плазма разрежена, нагреваемые ионы приобретают немаксвелловское распределение;

- двумерный турбулентный вязкий нагрев. Для осесимметричных течений плазмы в азимутальном магнитном поле возникающая турбулентность может быть двумерной, поскольку магнитное поле препятствует изгибанию силовых линий и появлению соответствующих движений.

В отличие от трехмерного случая, поскольку диссипация энергии двумерной турбулентности не связана с передачей энергии к малым масштабам, для расчетов плазменных течений в магнитном поле необходимо правильно описывать физические механизмы, приводящие к диссипации (физическую вязкость) [23]. Реально это должно приводить к большим временам релаксации турбулентного движения.

### *Заключение*

К настоящему времени накоплен большой экспериментальный и расчетно-теоретический материал, позволивший понять основные физические процессы, определяющие работу системы МАГО.

В отсеке дожатия удастся создать плазму, нагретую до температуры 0,3 кэВ при плотности  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Время существования подогретой плазмы порядка 2–3 мкс. Для экспериментов по сжатию подогретой плазмы требуется 5–10 мкс.

В лайнерных экспериментах с ВМГ достигнуты характеристики лайнера, необходимые для достижения зажигания: энергия ~25 МДж, скорость ~0,8 см/мкс.

Развитие систем МАГО-МТФ должно опираться на результаты исследований в области физики высоких плотностей энергии, а именно на данные по уравнениям состояния (в том числе для неидеальной плазмы и плотной теплой материи), коэффициентам, определяющим взаимодействие излучения с веществом (в том числе коэффициентам непрозрачности для плотной многозарядной плазмы), кинетическим коэффициентам (в том числе по электропроводности неидеальной плазмы), данные по ударным волнам и их структуре (в том числе бесстолкновительным ударным волнам), данные по взаимодействию сверхсильных (мегагауссных) магнитных полей с веществом и поверхностным разрядам в таких полях, результаты исследований различных гидродинамических и магнитогидродинамических неустойчивостей и т. д.

Методы и многие элементы, развитые в системах МАГО-МТФ, можно использовать для различных задач физики высоких плотностей энергии, например для исследований динамических свойств материалов (уравнений состояния, динамической прочности, явлений разрушения и др.), поверхностных разрядов в сильных магнитных полях (включая разряды на поверхности изолятора и взаимодействие сильных магнитных полей с поверхностью металла), гидродинамических и магнитогидродинамических неустойчивостей, изучения поведения различных гидродинамических и магнитогидродинамических течений для калибровки численных методик; с их помощью можно исследовать и развивать новые области физики высоких плотностей энергии, такие как механизм нагрева плазмы с помощью бесстолкновительных ударных волн, аномальный нагрев в приэлектродных плазменных течениях, двумерный турбулентный вязкий нагрев и т. д.

### **Список литературы**

1. Буйко А. М., Гаранин С. Ф., Губков Е. В. и др. Магнитогидродинамические расчеты нагрева замагниченной плазмы ударной волной при сверхзвуковом истечении из сопла // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1983. Вып. 3(14). С. 30–32.

2. Lindemuth I. R., Kirkpatrick R. C. Parameter space for magnetized fuel targets in inertial confinement fusion // *Nuclear Fusion*. 1983. Vol. 23, N 3. P. 263–284.
3. Buyko A. M., Chernyshev V. K., Demidov V. A., et al. Investigations of thermonuclear magnetized plasma generation in the magnetic implosion system MAGO // *Dig. Tech. Papers. 9th IEEE Int. Pulsed Power Conf.* / Eds. K. Prestwich, W. Baker. – New York: IEEE, 1993. Vol. 1. P. 156–162.
4. Garanin S. F., Mamyshev V. I., Yakubov V. B. The MAGO system: current status // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2006. Vol. 34, N 5. Part III. P. 2273–2278.
5. Lindemuth I. R., Siemon R. E. The fundamental parameter space of controlled thermonuclear fusion // *Am. J. Phys.* 2009. Vol. 77, N 5. P. 407–416.
6. Faehl R. J., Anderson B. G., Clark D. A. et al. Results of a 100-megaampere liner implosion experiment // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2004. Vol. 32, N 5. Part I. P. 1972–1985.
7. Degnan J. H., Cavazos T., Clark D. et al. On research on magnetic pressure implosion of long cylindrical liners, suitable for subsequent compression of the Field Reversed Configuration type of compact toroids // *Proc. IX Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics* / Eds. V. D. Selemir, L. N. Plyashkevich. – Sarov: VNIIEF, 2004. P. 730-737.
8. Frese M. H., Frese S., Marklin G. et al. FRC plasma formation for Magnetized Target Fusion // *Ibid.* P. 672–677.
9. Grabovski C., Degnan J., Babineau M. et al. FRC compression heating experiment (FRCHX) at AFRL // *Dig. Tech. Papers of Pulsed Power & Plasma Science 2007 Conf.* / Eds. E. Echamiloglu, F. Peterkin in Cooperation with IEEE Nucl. Plasma Sci. Society. Vol. 2. P. 1728–1731.
10. Degnan J. H., Adamson P., Amdahl D. J. et al. Field Reversed Configuration (FRC) formation and compression // *Proc. XIII Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics. Suzhou, China, 2010* / Eds. Sun Chengwei, Liu Cangli. – Press of National University of Defense Technology, 2012. P. 553–563.
11. Reinovsky R. E., Atchison W. L., Rousculp C. L. et al. Pulsed high magnetic fields for exploring the dynamic properties of materials // *Ibid.* P. 44–45.
12. Buyko A. M., Garanin S. F., Gorbachev Yu. N., et al. Explosive magnetic liner devices to produce shock pressures up to 3 TPa // *Dig. Tech. Papers of IEEE Pulsed Power Conf. Washington, USA, 2009.* P. 215–220.
13. Garanin S. F. Surface discharges in strong magnetic fields // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2010. Vol. 38, N 8. Part I. P. 1850–1855.
14. Awe T. J., Bauer B. S., Fuelling S., Siemon R. E. Threshold for thermal ionization of an aluminum surface by pulsed megagauss magnetic field // *Phys. Rev. Lett.* 2010. Vol. 104, N 3. P. 035001.
15. Garanin S. F., Kuznetsov S. D., Atchison W. L. et al. Numerical simulations of thick-aluminum-wire behavior under megaampere-current drive // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2010. Vol. 38. P. 1815–1821.
16. Reinovsky R. E., Anderson W. E., Atchison W. L. et al. Pulsed power hydrodynamics: a new application of high magnetic field // *Proc. IX Int. Conf. Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics* / Eds. V. D. Selemir, L. N. Plyashkevich. – Sarov: VNIIEF, 2004. P. 696–705.

17. Atchison W. L., Faehl R. J., Lindemuth I. R. et al. Dependence of solid liner stability on drive conditions during magnetic implosion // *Ibid.* P. 710–717.
18. Buyko A. M., Garanin S. F., Karmishin D. V. et al. Analysis of the liner stability in various experiments // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2008. Vol. 36. P. 4–9.
19. Великович А. Л., Либерман М. А. Физика ударных волн в газах и плазме. – М.: Наука, 1987.
20. Гаранин С. Ф., Голубев А. И., Исмаилова Н. А. Двумерное моделирование перпендикулярной бесстолкновительной ударной волны // *Физика плазмы.* 2000. Т. 26, № 5. С. 426–433.
21. Гаранин С. Ф. Приэлектродные слои, возникающие при ускорении замагниченной плазмы // *Физика плазмы.* 2000. Т. 26, № 4. С. 309–317.
22. Garanin S. F., Golubev A. I., Ismailova N. A. Boundary layer formation in a flow of collisionless magnetized plasma // *Proc. of the 13<sup>th</sup> Int. Conf. on High-Power Particle Beams (BEAMS 2000)* / Eds. K. Yatsui, W. Jiang. – Nagaoka University of Technology, 2001. P. 68–71.
23. Гаранин С. Ф., Амеличева О. А., Буренков О. М. и др. Релаксация двумерного МГД течения поперек магнитного поля (двумерного гидродинамического течения) в ограниченной области // *ЖЭТФ.* 2003. Т. 124, № 1(7). С. 70–79.

## High Energy Densities and Magnetic Compression

**S. F. Garanin**

*MAGO/MTF approach presumes preliminary heating of the magnetized DT plasma up to the temperatures of 0.2–0.4 keV followed by adiabatic plasma compression with the liner in order to reach the ignition of thermonuclear reactions. The level of energy densities to be reached at such compression corresponds to the level of pressure of dozens of megabars.*

*MAGO system for its development should rely on the results of the research in different areas of high-density physics. On the other hand, the research itself within MAGO-system enriches high-density physics areas and provides new methods for the investigations.*