

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАЗЛЕТА СФЕРИЧЕСКОЙ МИШЕНИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ НА СТЕНДЕ «МКВ-4» EXPERIMENTAL, THEORETICAL AND COMPUTATIONAL INVESTIGATION OF THE SPREAD OF A SPHERICAL TARGET IN MAGNETIC FIELD ON «MKV-4» TESTBED

*Д. О. Ананьин, И. М. Анисина, А. В. Гусаков, В. А. Жмайло, О. Е. Кочеткова, И. Н. Никитин,  
Е. А. Новикова, Н. А. Огурцов, В. А. Стародубцев, В. П. Стаценко, Р. Р. Сунгатуллин*

*D. O. Ananin, I. M. Anisina, A. V. Gusakov, V. A. Zhmailo, O. E. Kochetkova, I. N. Nikitin,  
E. A. Novikova, N. A. Ogurtsov, V. A. Starodubtsev, V. P. Statsenko, R. R. Sungatullin*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

E-mail: starodub@otd13.vniief.ru

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics

E-mail: starodub@otd13.vniief.ru

Ранее в работах [1, 2] были представлены первые результаты исследования взаимодействия плазменных образований, возникающих при лазерном облучении сферической мишени в фоновом газе с магнитным полем на стенде «МКВ-4» установки «Искра-5». В данном докладе эти результаты дополняются и уточняются новыми результатами, полученными с большим магнитным полем ( $\sim 1000$  Гс) при интервалах давления  $\sim (10^{-5} \div 10^{-2})$  Торр. Для интерпретации результатов используется новая численная методика «ЭГАК-МП6» [3].

The very first results of investigating the interaction of plasmas generated by exposing to laser radiation a spherical target in a background gas with magnetic field in experiments on the «MKV-4» testbed of «Iskra-5» laser facility were earlier presented in papers [1, 2]. The current report gives additional and new results obtained in a high magnetic field ( $\sim 1000$  Gs) within pressure ranges from  $\sim 10^{-5}$  to  $10^{-2}$  torr. The new «EGAK-MP6» code [3] is used for the results treatment.

### Введение

Изучение взаимодействия облака плазмы с внешним магнитным полем представляет интерес для многих прикладных и фундаментальных задач. Среди них можно назвать задачи, связанные с удержанием плазмы в магнитных ловушках, задачи о динамике искусственных радиационных поясов Земли или о взаимодействии остатков Сверхновых с межзвездным магнитным полем.

В последние годы для исследования этих явлений используется метод лабораторного моделирования с помощью лазерных установок. Примеры таких работ (вместе с подробной библиографией) представлены в [4–12]. В них подробно рассмотрены эффекты торможения плазмы магнитным полем и возмущения поля при расширении этой плазмы.

В течение ряда лет эксперименты по моделированию процессов взаимодействия плазмы с внешним магнитным полем проводятся во ФГУП

«РФЯЦ-ВНИИЭФ» на стенде «МКВ-4», расположенном в одном из каналов лазерной установки «Искра-5» [13]. Постановка и результаты первых экспериментов представлены в работе [1]. В данной работе приводятся результаты ряда новых экспериментов и расчетов, которые уточняют и дополняют результаты работы [1]. В частности, расширен (до 1 кГс) диапазон изменения магнитного поля в камере, добавлены новые точки (в пространстве вокруг мишени) в измерениях поля и потоков плазмы.

### Постановка экспериментов

Эксперименты по изучению характеристик разлетающегося во внешнем магнитном поле плазменного облака проводились на стенде «МКВ-4», расположенном в одном из каналов йодного лазера «Искра-5». Основным элементом

стенда является цилиндрическая вакуумная камера из немагнитной нержавеющей стали с внутренним диаметром 1200 мм, толщиной стенки 8 мм и длиной 1900 мм (рис. 1). На внешней поверхности камеры, симметрично относительно ее центра, намотаны две пары обмоток (4 идентичных катушки). С помощью этих катушек создается однородное квазистационарное (время нарастания  $\approx 20$  мс) осесимметричное магнитное поле. Оси симметрии магнитного поля и вакуумной камеры совпадают. Стенд снабжен системами откачки, газонапуска и окнами для ввода лазерного излучения, и оснащен рядом плазменных диагностик.

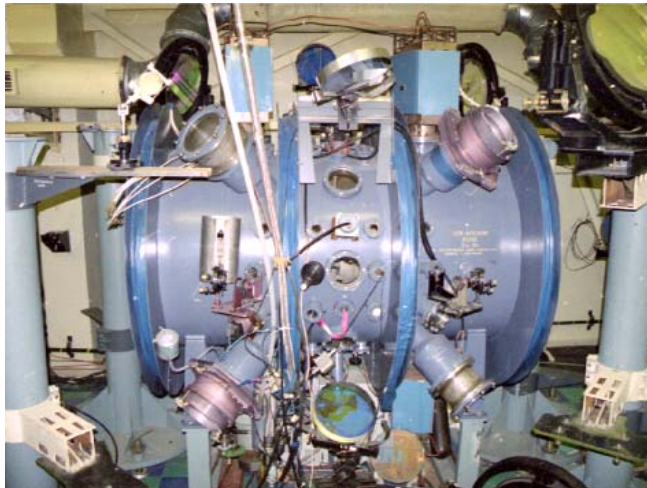


Рис. 1. Камера взаимодействия стенда «МКВ-4»

В центре камеры размещалась полая тонкостенная сферическая мишень из полипараксилилена (СН,  $\rho \approx 1,1$  г/см<sup>3</sup>, диаметр 4 мм, толщина стенки

2 мкм) с отверстием для ввода излучения диаметром 0,8 мм. Мишень подвешивалась на тонких нихромовых проволоках  $\varnothing = 0,5$  мм (рис. 2).

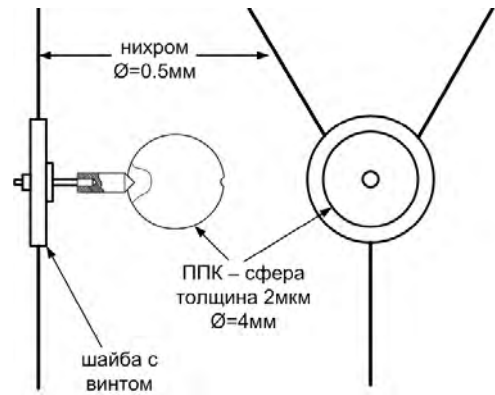
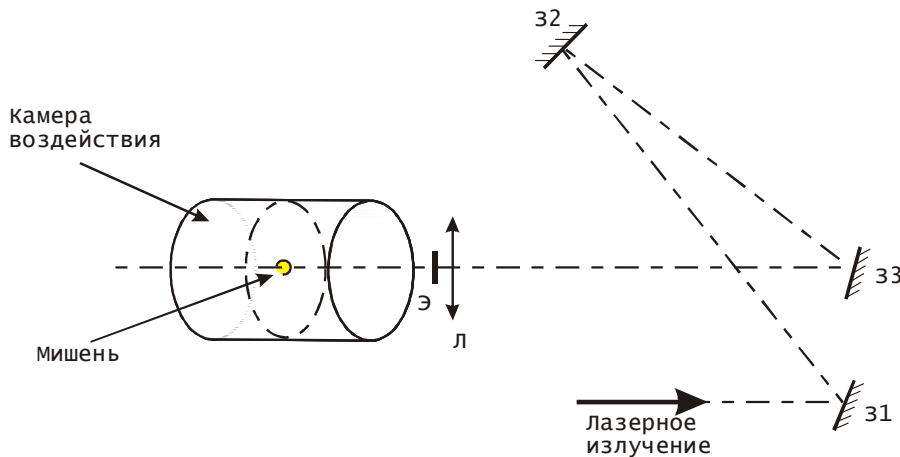


Рис. 2. Схема подвеса сферической мишени в экспериментах

Излучение основной гармоники (1,315 мкм) одного из каналов лазерной установки «Искра-5» (длительность импульса  $\tau_{0,5} \approx 0,5$  нсек, энергия лазерного излучения  $E_{ли} \approx 300$  Дж), направленное вдоль оси камеры взаимодействия, при помощи асферической линзы с фокусным расстоянием  $F = 2$  м вводилось через отверстие в сферическую мишень (рис. 3). В результате формировалось сферически разлетающееся плазменное облако, и исследовалось его взаимодействие с внешним магнитным полем.

Напряженность внешнего однородного осесимметричного магнитного поля в опытах варьировалась в диапазоне  $(0,5 \div 1)$  кГс. Величина давления фонового воздуха составляла  $\sim (10^{-2} \div 10^{-5})$  Тор.



31 - 33 - поворотные зеркала ЛИ;  
Л - асферическая линза (фокус 2м; размер пятна в фокусе 200мкм);  
Э - экран для защиты от отраженного ЛИ;

Рис. 3. Оптическая схема облучения сферической мишени

В ходе экспериментов измерялись:

- возмущения внешнего магнитного поля с помощью индукционных датчиков;
- параметры плазменных потоков с помощью плазменных зондов.

Для измерения возмущений магнитного поля разлетающейся лазерной плазмой были разработаны датчики в виде малогабаритных катушек индуктивности (Мд). Характерной особенностью данного датчика является то, что он состоит из 2-х симметричных обмоток, намотанных на каркас  $\varnothing 5$  мм и длиной 9 мм, помещенных в медный экран с тремя щелями толщиной  $\sim 1$  мм. Экран защищает датчик от электростатических наводок, обусловленных случайными полями и взаимодействием с полем систем источников питания, а также от помех, возникающих при воздействии плазмы на датчик.

В качестве плазменных зондов использовались двойные зонды Ленгмюра (Л) с одинаковыми сечениями центральной жилы и опорного электрода. Двойной зонд благодаря специальной схеме подключения позволяет вычитать синфазные наводки, что обеспечивает его помехоустойчивость.

Взаимное расположение мишени, измерительных датчиков импульсного магнитного поля (Мд) и плазменных зондов Ленгмюра (Л) в опытах приведено на рис. 4.

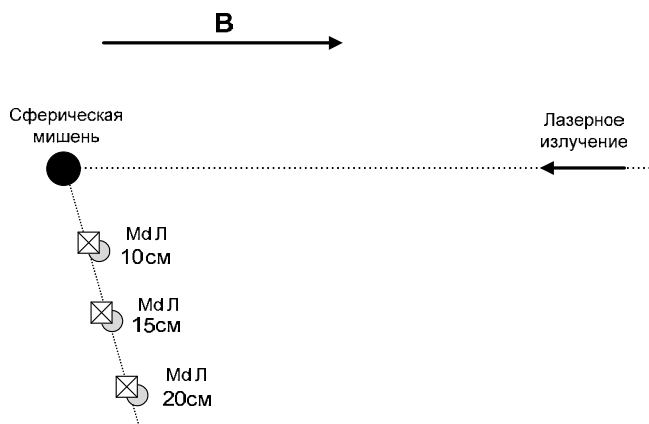


Рис. 4. Расположение мишени и измерительных датчиков в экспериментах

## Расчетные методики и постановки расчетов

Для проведения расчетов разлета мишеней и их взаимодействия с магнитным полем в данной работе использовались две численные методики.

Первая из них – «СНДП» [14] – предназначена для решения одномерных уравнений радиационной газовой динамики с использованием модели среднего иона. В данную методику был добавлен учет магнитного поля (в секторном приближении) и джоулева разогрева.

Вторая методика – «ЭГАК-МП6» [3] – разработана для расчета двумерных течений разреженной плазмы в магнитном поле. Она основана на многопоточковом приближении для решения соответствующих кинетических уравнений. При численной реализации уравнений в лагранжево-эйлеровой методике используется единая для всех компонентов расчетная сетка, состоящая из четырехугольных ячеек, которая может двигаться в процессе счета по определенным исполнителем расчета алгоритмам, в простейшем случае сетка является неподвижной.

Расчет по этой методике проводился в следующей постановке. Мишень рассматривалась как оболочка (СН) с радиусами 0,2 и 0,25 см. Рассматривались опыты с двумя значениями давления в камере (см. ниже). Энерговыведение в мишени варьировалось (с тем, чтобы приближенно учесть анизотропию ее разлета).

Рассчитывалось движение электронов и 6 потоков «тяжелых» частиц: 0 – ионы углерода, 1 – нейтральные атомы углерода, 2 – ионы водорода, 3 – нейтральные атомы водорода, 4 – ионы воздуха (кислород и азот), 5 – нейтральные атомы воздуха.

Вводились следующие характерные величины: время  $t_0 = 10^{-6}$  с, расстояние  $l_0 = 1$  см, масса  $M_0 = 10^{-9}$  г, температура  $T_0 = 1$  эВ =  $1,6 \times 10^{-12}$  эрг, скорость  $u_0 = l_0 / t_0 = 10^6$  (см/с), плотность  $\rho_0 = M_0 / l_0^3 = 10^{-9}$  (г/см<sup>3</sup>) =  $\rho_{\text{норм}}$ , концентрация  $n_0 = M_0 / l_0^3 m_0 \approx 4 \times 10^{13}$  1/см<sup>3</sup>.

Распределение плотностей и энергий по областям в начальный момент дано в таблицах.

Таблица 1

Параметры потоков в первой области ( $r < 0,2$ )

$k$	1	2	3	4	5	6	$e$
$\rho$	1	1	1	1	1e-10	1e-10	16,25
$u$	0	0	0	0	0	0	0
$\varepsilon$	0,296	0,296	3,55	3,55	0,0026	0,0026	1,067

Таблица 2

Параметры потоков во второй области ( $0,2 < r < 0,25$ )

$k$	1	2	3	4	5	6	$e$
$\rho$	2,85e+6	28804	2,38e+5	2409	1e-10	1e-10	7,15e+6
$u$	0	0	0	0	0	0	0
$\varepsilon$	0,296	0,296	3,55	3,55	0,0026	0,0026	1,067

Таблица 3

Параметры потоков в третьей области ( $r < 60$ )

$k$	1	2	3	4	5	6	$e$
$\rho$	1e-10	1e-10	1e-10	1e-10	0,00013	0,0128	0,00013
$u$	0	0	0	0	0	0	0
$\varepsilon$	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026	0,0026	0,909267

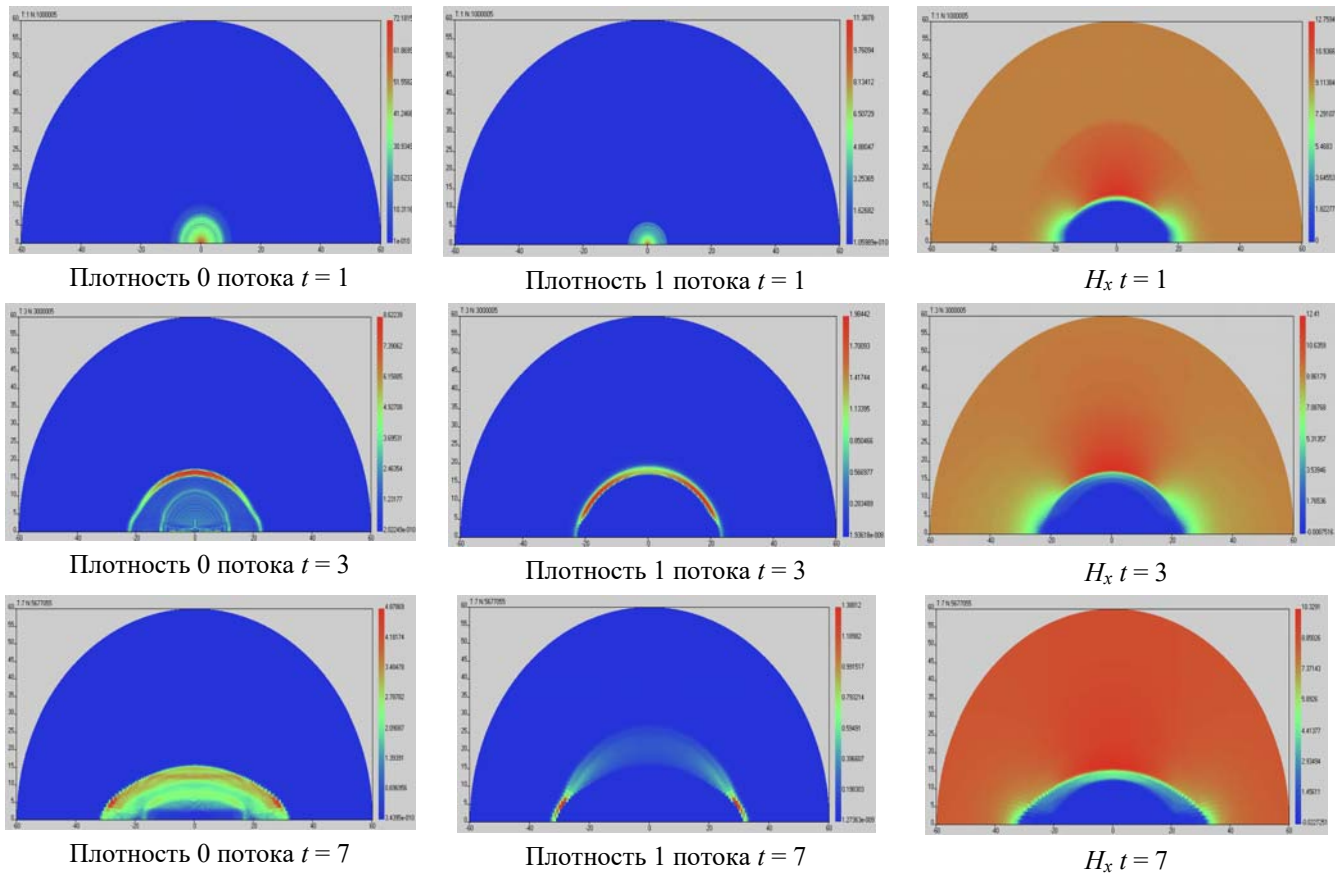


Рис. 5. Расчетные распределения плотности ионов углерода и водорода и продольной компоненты магнитного поля (расстояние указано в сантиметрах)

На рис. 5 приводятся данные расчетов относительно пространственного распределения плотности ионов углерода и водорода, а также продольной компоненты магнитного поля на моменты времени 1, 3 и 7 мкс.

Постановка расчетов по первой из упомянутых выше методик бала аналогичной.

### Результаты экспериментов

На рис. 6 приведены результаты экспериментов, в которых напряженность внешнего квазистационарного магнитного поля составляла величину  $H_0 = 500$  Гс, а давление фонового воздуха –  $P_0 = 10^{-2}$  Тор, а также соответствующие им расчетные кривые.

Полученные в опытах зависимости возмущения магнитного поля от времени  $H(t)$  представлены в виде  $[H_0 + H(t)]$ , где  $H_0$  – начальное квазистационарное магнитное поле, а электрические сигналы с плазменных зондов были преобразованы в зависимости плотности потоков положительных зарядов плазмы на зонд от времени  $j(t)$ .

Из рисунка 6 видно, что, по меньшей мере, для датчиков, расположенных на расстоянии  $L = 10$  см от мишени, происходит полное вытеснение магнитного поля. Время формирования области максимального вытеснения составило величину  $t_m \approx (4 \dots 7)$  мкс. Вместе с тем, при  $t \approx 2$  мкс с помощью этих датчиков зарегистрировано поджатие магнитного поля на  $\approx 40\%$ . С помощью датчиков, расположенных на расстоянии 20 см от сферической мишени удалось зарегистрировать незначительное вытеснение магнитного поля при  $t \approx 10$  мкс. Минимальное остаточное поле составило величину  $\approx 90\%$  от начального. Если сравнивать сигналы с магнитных датчиков и плазменных зондов, расположенных на одних и тех же расстояниях, то можно заметить, что начало поджатия

магнитного поля, соответствует началу сигнала на плазменном зонде, а максимум вытеснения магнитного поля лежит за фронтом налетающей плазмы.

Результаты экспериментов, в которых напряженность внешнего квазистационарного магнитного поля составляла величину  $H_0 = 1000$  Гс, а давление фонового воздуха –  $P_0 = 10^{-5}$  Тор и соответствующие им расчетные кривые представлены на рис. 7.

Из рис. 7 следует, что в области нахождения магнитных датчиков, расположенных на расстоянии  $L = 15$  см от мишени, происходит неполное вытеснение магнитного поля при  $t \approx 4$  мкс. Минимальное остаточное поле составило величину  $22\%$  от начального. При сравнении сигналов с магнитных датчиков и плазменных зондов видно, что максимум вытеснения магнитного поля лежит за фронтом налетающей плазмы.

Результаты, полученные при помощи плазменных зондов (Л) в экспериментах без магнитного поля, и соответствующие им расчетные кривые приведены на рис. 8.

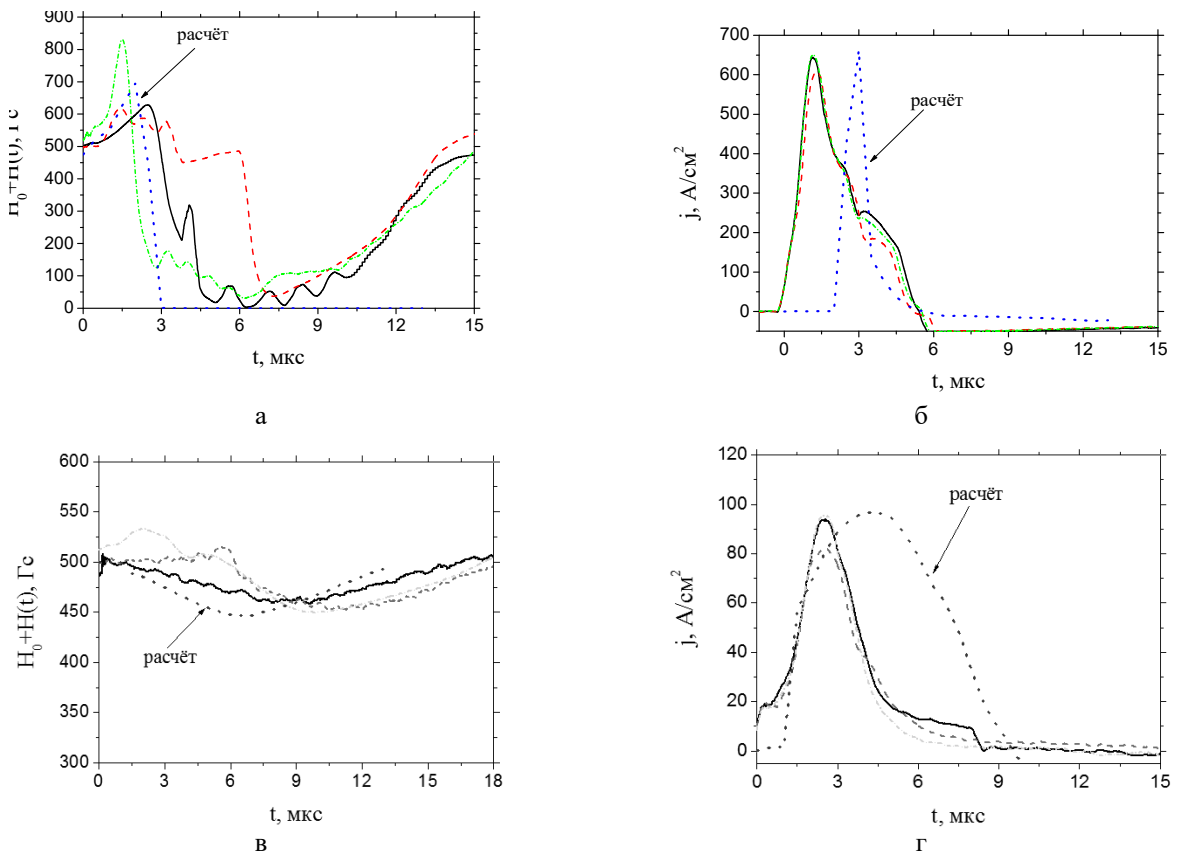


Рис. 6. Результаты экспериментов, полученные при помощи: а – магнитных датчиков (Мд), расположенных на расстоянии 10 см от мишени; б – плазменных зондов (Л), расположенных на расстоянии 10 см от мишени; в – магнитных датчиков (Мд), расположенных на расстоянии 20 см от мишени; г – плазменных зондов (Л), расположенных на расстоянии 20 см от мишени

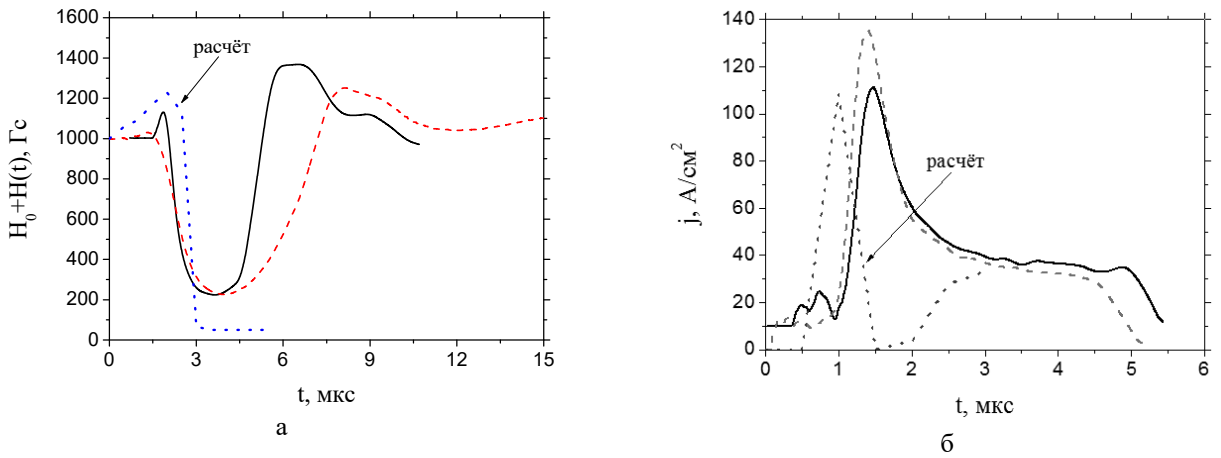


Рис. 7. Результаты экспериментов, полученные при помощи датчиков, расположенных на расстоянии 15 см от мишени: а – магнитные датчики (Мд); б – плазменные зонды (Л)

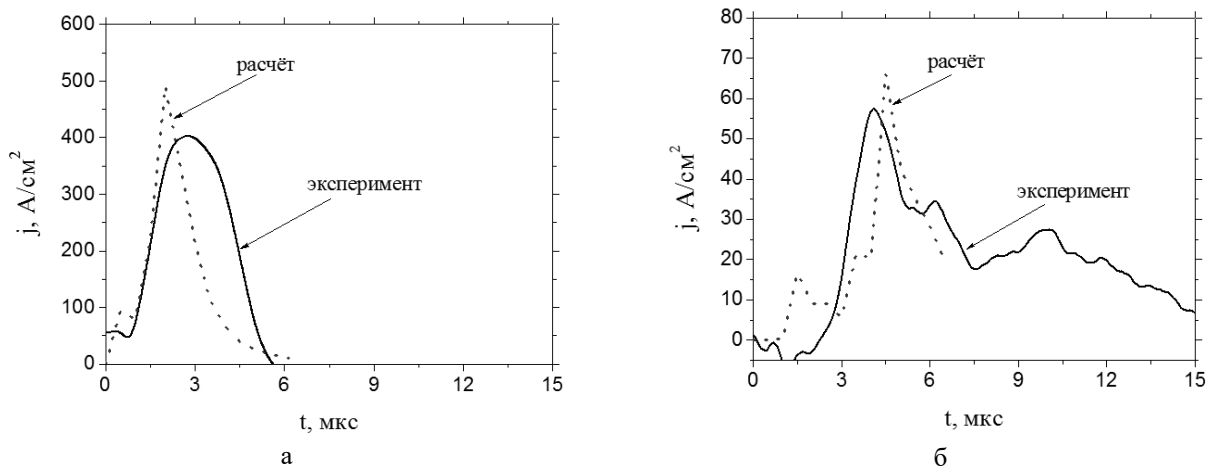


Рис. 8. Зависимость плотности тока на зонд от времени в опытах без магнитного поля ( $H_0 = 0$  Гс): а – расстояние до мишени 10 см; б – расстояние до мишени 20 см

### Заключение

В данной работе кратко описаны предварительные результаты исследования эффектов, связанных с развитием турбулентности в разреженной плазме с магнитным полем.

Проведенное сравнение расчетов с соответствующими результатами опытов на стенде «МКВ-4» показывает, что на основе описанных выше физических моделей можно получить разумное согласие между этими результатами.

Тем не менее, учитывая сложность решаемой задачи, предполагается продолжить серию экспериментов на стенде «МКВ-4» установки «Искра-5», используя более полную диагностику, с вариацией параметров «атмосферы», магнитного поля и типов мишеней и их теоретическое исследование.

### Список литературы

1. Бессараб А. В., Бондаренко Г. А., Долголева Г. В. и др. Исследование механизмов диффузии магнитного поля в разлетающуюся лазерную плазму // Физика плазмы. 2007. Т. 33, № 10. С. 891–904.
2. Ананьин Д. О., Бессараб А. В., Бондаренко Г. А. и др. Исследование взаимодействия облака лазерной плазмы с магнитным полем в опытах на стенде «МКВ-4» и их расчетно-теоретическая интерпретация // Заббахинские научные чтения, 2014. С. 32–36.
3. Анисина И. М., Жмайло В. А., Кочеткова О. Е. Шестипотоковая двумерная методика «ЭГАК-МПб» для расчета образования и движения разреженной плазмы в магнитном поле //

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2014. Вып. 1. С. 24–37.

4. Coorphan D. W. Phys. Fluids. 1971. Т. 14. Р. 1707.

5. Антонов В. М., Башурин В. П., Голубев А. И. и др. ПМТФ. 1985, № 6. С. 6–9.

6. Антонов В. М., Башурин В. П., Голубев А. И. и др. ДАН СССР. 1986. Т. 289. С. 72–75.

7. Захаров Ю. П., Оришич А. М., Пономаренко А. Г., Посух В. Г. ФП. 1986. Т. 12. С. 1170–1175.

8. Захаров Ю. П., Оришич А. М., Пономаренко А. Г., Посух В. Г. ФП. 1988. Т. 14. С. 203–210.

9. Kasenjar S., Haussman M., Keskinen M. et al. Phys. Fluids. 1986. Т. 29. Р. 2007–2012.

10. Ripin B. H., Huba J. D., McLean E. A. et al. Phys. Fluids. 1993. В. 5. Р. 3491–3506.

11. Zakharov Yu. P. et al. Proceed. of 1996 Intern. Conf. On Plasma Physics (Nagoya, 1996), 2, 1674.

12. Dimonte G. and Wiley L. Phys. Rev. Letters. 1991. Т. 67. Р. 1755–1758.

13. Анненков В. И., Багрецов В. А., Безуглов В. Г. и др. Импульсный лазер мощностью 120 ТВт «Искра-5». Квантовая электроника. 1991. Т. 18, № 5.

14. Бельков С. А., Долголева Г. В. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1992. Вып. 1. С. 59.