

## ЛАБОРАТОРНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ ЗАМАГНИЧЕННЫХ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН СГУСТКАМИ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЫ С ИОНАМИ РАЗНЫХ МАСС (M/Z)

## LABORATORY AND NUMERICAL SIMULATIONS OF THE GENERATION OF MAGNETISED COLLISIONLESS SHOCKS BY LASER-PLASMA BLOBS WITH THE IONS OF DIFFERENT MASS (M/Z)

Ю. П. Захаров, В. А. Терехин<sup>1</sup>, А. Г. Пономаренко, И. Ф. Шайхисламов, А. Г. Березуцкий, Э. Л. Бояринцев, К. В. Вишневков, А. В. Мелехов, В. Г. Посух, М. А. Руменских, А. А. Чибранов

Yu. P. Zakharov, V. A. Terekhin<sup>1</sup>, A. G. Ponomarenko, I. F. Shaikhislamov, A. G. Berezutski, E. L. Boyarintsev, K. V. Vchivkov, A. V. Melekhov, V. G. Posukh, M. A. Rumenskikh, A. A. Chibranov

ФГУН Институт Лазерной Физики (ИЛФ) СО РАН, Пр. Лаврентьева, 13/3, 630090, Новосибирск, Россия

<sup>1</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

FSIS Institute of Laser Physics (ILP) SB RAS Av. Lavrentyeva 13/3, 630090, Novosibirsk, Russia  
<sup>1</sup>Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics

Несмотря на многочисленные попытки генерации бесстолкновительных ударных волн (БУВ) в замагниченной фоновой плазме (ФП) за счет поршня – сгустка лазерной плазмы (ЛП) в 70–80-х гг. [1], только недавно такие БУВ были получены впервые в экспериментах на установках «КИ-1» ИЛФ и LAPD в США, в основном, за счет создания сгустков ЛП большой эффективной энергии ~1 кДж. Однако, даже при использовании в них развитых методов зондовой, ЭОПной и спектроскопической диагностики, а также, сопровождающих их 2<sup>x</sup> и 3<sup>x</sup>-мерных гибридных расчетов, и, наконец, разработанной (во ВНИИЭФ [2, 3] в тот же период) физической модели магнитного ламинарного механизма (МЛМ) для бесстолкновительного взаимодействия ЛП с ФП, многие принципиальные вопросы, как процессов самого МЛМ, так и генерации БУВ за счет МЛМ, остаются открытыми. Одним из основных таких вопросов является практически важный эффект влияния сложного ионного состава плазмы поршня на эффективность его МЛМ-взаимодействия с фоновой плазмой, особенно при существенно сверх-альфвеновских скоростях  $V_0 \geq (4\div 5)C_a$ , разлета поршня взрывающейся плазмы.

In spite of numerous attempts in 70÷80<sup>th</sup> [1] to generate the Collisionless Shock Wave (CSW) in magnetized Background Plasma (BP), due to action of Laser Plasma (LP) blob, as a piston, only recently such CSW were obtained for the first time in experiments at the «KI-1» facility (of ILP) and LAPD one (in USA), above all, due to progress in creation of LP with a large effective energy up to 1 kJ. However, even with the using a lot of diagnostics (Langmuir and magnetic probes, spectroscopic methods and GOI – Gated Optical Imager) and accompanying them by 2D and 3D-Codes of Hybrid simulation, as well as by the physical model of VNIIEF for Magnetic Laminar Mechanism (MLM [2, 3], developed during the same period) of collisionless interaction between LP and BP, a lot of basic problems still exist in the field of MLM-processes itself and their role in the CSW generation. Especially, for the practically important case of complex ion-composition in LP-piston and essentially super-Alfvénic velocity  $V_0 \geq (4\div 5)C_a$  of its explosive expansion.

### 1. Введение

Проблема формирования БУВ и бесстолкновительного взаимодействия, в целом, между взаимопроникающими (поперек магнитного поля  $\mathbf{B}_0$ ) сверх-альфвеновскими потоками плазмы заключа-

ется в том, что при числах Альфвена – Маха  $Ma_0 = V_0/C_a \geq 4\div 5$  могут стать неэффективными [6, 7, 12] почти все известные ламинарные и турбулентные механизмы передачи импульса между ними за счет электромагнитных полей. Исключение представляет именно магнитный ламинарный

Механизм (МЛМ), идея [4] которого и соответствующая ей структура магнитных полей (в сферическом случае [5]), были первоначально разработаны в США, однако, в завершённом виде (подтвержденном численными расчетами) были впервые доведены [2, 3] до практического применения в России. Эти работы ВНИИЭФ и уникальные возможности стенда Космические Исследования – 1 (КИ-1 в ИЛФ, а ранее в ИТПМ СО РАН), позволили подготовить эксперимент «Облако» [6] и впервые получить экспериментальное подтверждение [8–10, 14] реальной эффективности МЛМ при  $M_{A0} \approx 6 \div 7$  и достаточно большом параметре МЛМ-взаимодействия  $\delta_0 = R_*^2 / R_L R_L^* \sim 0,3$ . Здесь (в простейшем случае однородного, по концентрации  $n_e$  электронов облака),  $\delta_0$  определяется ларморовскими радиусами ионов ЛП и ФП,  $R_L$  и  $R_L^*$ , соответственно (рассчитанными по скорости  $V_0$  фронта ЛП), а масштаб  $R_* = (3N_0/4\pi n_*)^{1/3}$  определяет [3, 5] максимальный радиус диамагнитной каверны сферического облака ЛП с полным числом электронов  $N_0$ , в фоне с концентрацией  $n_*$  (именно при  $M_{A0} > 1$ , т. е. в случае возможной БУВ). В настоящее время, только на лазерном модельном стенде КИ-1 ИЛФ СО РАН [8–10, 14] и крупнейшей модельной установке LAPD в США [21–25], в близкой постановке проводятся целенаправленные и успешные исследования по теме замагниченных БУВ, в отличие, например, от экзотических попыток на установках Vulcan [27] в Англии или Gekko [28] в Японии. В ИЛФ СО РАН постановка этих экспериментов [14–20] осуществляется в сотрудничестве с ВНИИЭФ, а в США – в сотрудничестве LAPD с Лабораторией Лос-Аламоса, где проводятся соответствующие расчеты по гибридной модели [13], а также дополнительные эксперименты с CO<sub>2</sub>-лазером «Trident» кДж-класса [22].

## 2. Постановка экспериментов по моделированию замагниченных БУВ на лазерном стенде КИ-1 ИЛФ СО РАН. Требуемые критерии подобия задачи с учетом сложного ионного состава лазерной плазмы, как сферического поршня, генерирующего БУВ

Согласно МЛМ-модели ВНИИЭФ [2, 3], введенный в ней МЛМ-параметр имеет принципиально важный смысл, как коэффициент передачи энергии  $E_0 = 0,3N_0(m/z) \cdot V_0^2$  облака фону ( $E_*$ ), в виде простого соотношения  $E_{*max} \approx K \cdot \delta_0 \cdot E_0$  (при

$\delta_0 \leq 1$ ), где некая интегральная величина  $K \sim 0,3 \div 1$  зависит от распределения  $m/z$  и  $n_e(r)$  внутри облака (или начальной функции распределения ионов облака [3]). За счет вытеснения магнитного поля из области радиусом  $R_*$  (при сохранении обобщенного момента импульса  $B_0$  и ФП), на границе каверны возникает вихревое электрическое поле  $E_\phi (\sim V_0 B_0 / C)$ , вдоль которого ускоряются ионы ФП, в то время как ионы ЛП замедляются в своем ларморовском вращении (противоположном  $E_\phi$ ). В результате, возникает взаимодействие между ионами ЛП и ФП достаточно сильное для генерации БУВ при необходимых условиях (которые были получены в МЛМ-модели и гибридных расчетах ВНИИЭФ [3]), главное из которых – величина МЛМ-параметра  $\delta_0 \geq 1$ . С учетом наиболее интересного диапазона по  $M_{A0} \geq 5 \div 7$ , таких значений  $\delta_0$  можно достигнуть только за счет достаточно большой энергии  $E_0 = 0,3N_0(m/z) \cdot V_0^2$  сферического облака ЛП. Точнее, за счет большого  $N_0$  – полного количества электронов облака, т. к. желательно умеренные  $V_0$ . Здесь  $m$  и  $z$  – масса и заряд ионов ЛП, скорость которых  $V_0$  не может быть меньше  $\sim 100$  км/с (из-за условий генерации ЛП [6, 14, 17]), поэтому и ларморовские радиусы ионов в  $\delta_0$  не могут быть меньше определенных значений. Причем, в случае ионов с разными  $m/z$  в ЛП, необходимо определять по среднемассовой величине  $\langle m/z \rangle$ , с учетом долей  $\eta_k$  электронов (от их полного числа  $N_0$ ), принадлежащих каждому сорту ионов. Это может быть обосновано в ситуации более или менее одинакового типа распределения  $\eta(r)$  всех ионов по радиусу облака, которая обычно реализуется в расчетах, но не обязательно выполняется в условиях создания ЛП, а также в случае моделируемых явлений. В итоге, проведенный анализ [6, 14, 17] показал, что для экспериментов в «обычном» лабораторном диапазоне параметров крупных плазменных установок (с полями до кГс и концентрацией фона  $\sim 3 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup> в объеме  $\geq 1$  м<sup>3</sup>), для достижения требуемых  $\delta_0 \geq 1$  при  $M_{A0} \geq 7$ , необходимо создать сферическое облако ЛП с энергией  $E_0 \geq 1$  кДж.

В последние годы [15–17], во многом, именно с целью достижения условий генерации БУВ, на стенде КИ-1 были разработаны методы создания расширяющихся сгустков ЛП с плоских пластиковых мишеней, с большим диаметром пятна фокусировки от 10 до 20–30 мм, т. е. в режиме вблизи порога плазмообразования (где КПД преобразования энергии лазера  $Q$  в кинетическую энергию

плазмы  $E_k$  может достигать максимума, вплоть до  $\sim 50\%$  [17]). В результате, было установлено, что при разлете ЛП в пределах оптимального угла  $\Delta\Omega \sim 1$  ср, такой сгусток может также эффективно вытеснять магнитное поле (в направлении по нормали к мишени, вдоль оси  $X$  на рис. 1), как и облако ЛП, сферически-симметрично разлетающееся в  $\Omega = 4\pi$  с существенно большей энергией, в  $(4\pi/\Delta\Omega)$  раз. Физически это соответствует такому режиму расширения, при котором обеспечивается замыкание (требуемого для вытеснения поля  $B_0$ ) диамагнитного тока, а количественно, критерием такого-же уровня эффективности являются принципиально важные понятия эффективных полных величин  $N_0$  и  $E_0 \approx 4\pi \cdot (E_k/\Delta\Omega)$ . В случае КИ-1, например, это позволило наконец-то реализовать вариант [14] эксперимента по БУВ, с расположением плоской мишени (1) на краю столба ФП (рис. 1), на расстоянии 25 см от стенки цилиндрической камеры КИ-1, на торце которой располагался источник ФП типа  $\theta$ -пинча (4).

Параметры эксперимента «МЕГ-БУВ» были выбраны близкими к типичным для опытов по БУВ на стенде КИ-1 (см., например, правый столбец таблицы), но в качестве фона был выбран Гелий, в расчете на то, что его собственное свечение (и индуцированное в нем за счет перезарядки на нем ионов ЛП, как и их собственное из-за перезарядки) будет мало, потому что, например, мало сечение перезарядки  $C^{+n} + He$  [29]. Это оказалось оправданным, даже при требуемой достаточно большой концентрации фона  $n_* \approx 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , поэтому, чтобы выдержать требуемые (см. таблицу) величины определяющих критериев [14] подобия  $\delta_0 \geq 1$  и  $M_A \geq 3 \div 4$ , магнитное поле было увеличено до  $B_0 = 200$  Гс. В основных сериях опытов использовался  $CO_2$ -лазер/генератор ЗГ2 (с первым пиком малой энергии в импульсе излучения), при энергиях основного излучения  $Q \sim 200 \div 300$  Дж и эффективной энергии лазерной плазмы  $E_0 \sim 200$  Дж, ее скорость была на уровне  $V_0 \approx 140$  км/с для прихода основного фронта (рис. 2,  $t = 4$  мкс).

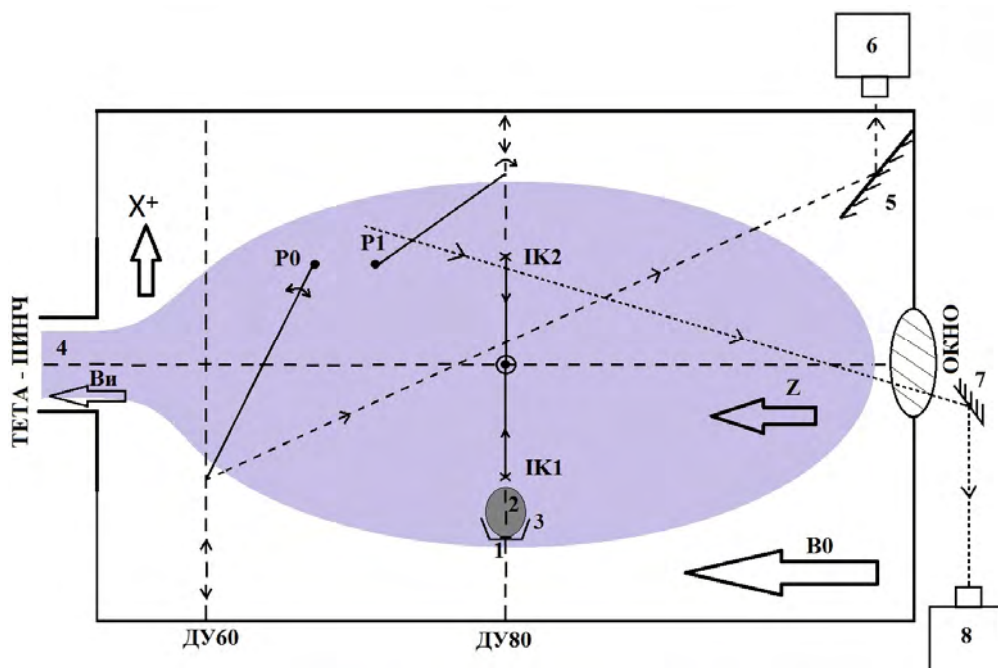


Рис. 1. Общая схема эксперимента «МЕГ-БУВ» в горизонтальной плоскости (Z-X) камеры КИ-1 ( $\varnothing 120$  см, длина 5 м): 1 – мишень ( $C_2H_4$ ); 2 – сгусток ЛП; 3 – экран из черной бумаги (типа части конуса с максимальным  $\varnothing 11,5$  см), чтобы не было засветки ЭОП (6) и МДР (8); 5, 7 – зеркала; 4 – поток  $He^+$  фоновой плазмы; P0, P1 – вводы комбинированных пар зондов (Ленгмюра + магнитные) перемещаемые в плоскости (Z-X), а P1 может вставать выше и ниже нее; IK1 и IK2 – аналогичные пары зондов ввода «Циркуль», симметрично раздвигающиеся по X и совместно передвигаемые вверх-вниз;  $B_0$  – поле в камере. Расстояние  $X(R, L)$  отсчитывается по от мишени-1

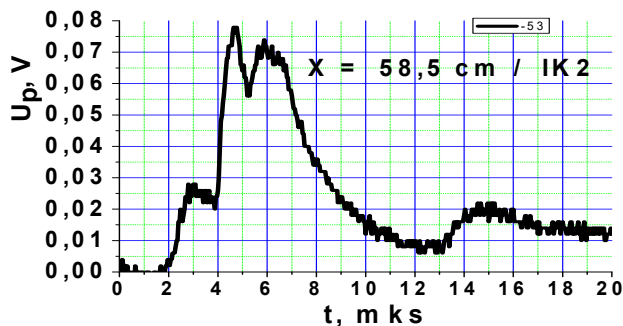


Рис. 2. Данные измерений зондами Ленгмюра исходной плотности ионного потока ЛПП по их выходному сигналу  $U_p \propto j_i \text{ (A/cm}^2\text{)} = e z_i (1 + \gamma_i) n_i V_i$ , в вакууме без магнитного поля (при облучении мишени лазером 3Г-2)

### 3. Основные результаты по взаимодействию лазерной плазмы с фоновой и формированию различного вида БУВ, обсуждение

На рис. 3 представлена данные системы МДР (с ФЭУ и контрольным блоком быстрой цифровой регистрации выделенных частей спектра), по регистрации динамики торможения отдельных ионных компонентов ЛПП в замагниченном  $\text{He}^+$ -фоне.

В таблице представлены основные параметры эксперимента МEG-БУВ на стенде КИ-1 (вместе с соответствующими параметрами расчетов по 2D-гибридной модели типа «Облако»-сфера [11]), которые выбирались исходя из основного требования моделирования – обеспечить достаточно эффективное МЛМ-взаимодействие при достаточно больших числах  $\text{Ma} \geq 3$ , при условии соблюдения указанных особенностей, связанных с оптической диагностикой.

На самом деле, важное значение могут иметь и другие критерии подобия задачи, такие, например, как плазменное бэта ФП  $\beta^*$  или сложный ионный состав ЛПП, с ионами, различающимися по  $m/z$  в несколько раз и, соответственно, разными масштабами их ларморовских траекторий (в сравнении с размерами каверны), когда МЛМ-оценка

$E_{\text{max}} \approx K \cdot \delta_0 \cdot E_0$  «в линейном приближении» для максимальной энергии (переданной от ЛПП в ФП), может стать неприменимой.

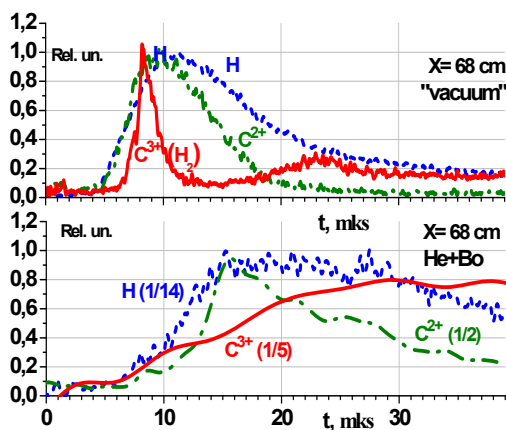


Рис. 3. Вверху – в вакууме (+H<sub>2</sub>) без поля; Внизу – в замагниченной фоновой плазме He<sup>+</sup>. Нижняя панель показывает эффект торможения лазерной плазмы при ее взаимодействии с замагниченным фоном. Уменьшение амплитуды сигнала по сравнению с вакуумным случаем указано в скобках. Измерения на разных расстояниях показывают, что в вакууме ЛПП распространяется со скоростью ~100 км/с, в то время, как в ходе взаимодействия с замагниченным фоном ее скорость падает до ~50 км/с

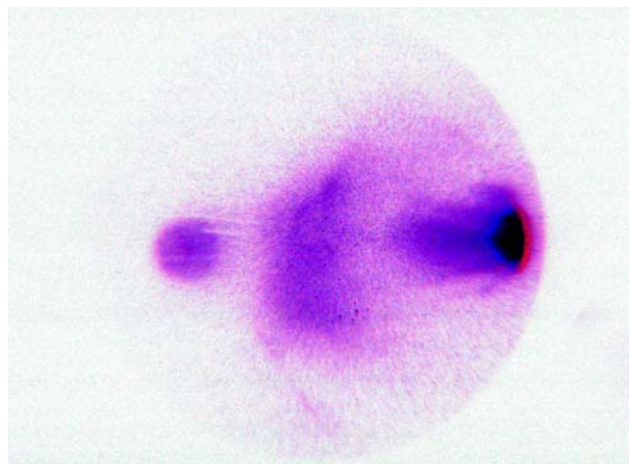
Основные параметры эксперимента МEG-БУВ

Сгусток Лазерной Плазмы (ЛПП)	Обозначения и величина в эксперименте	В расчетах
Скорость фронта ЛПП (и состав ионов)	$V_0 \approx 140 \text{ км/с}$ ( $\text{H}^+/\text{C}^+ <m/z> \sim 3 \text{ а.е.м.}$ )	130 км/с $\approx 3 \text{ а.е.м}$
Эффективная энергия и число электронов	$E_0 \sim 300 \text{ Дж}$ и $N_0 \sim 5 \cdot 10^{18}$	( $\text{H}^+ - 30\%$ ; $\text{C}^{+3} - 50\%$ ; $\text{C}^{+4} - 20\%$ )
<b>Фоновая Плазма (ФП)</b>		
Концентрация (и состав)	$n^* \approx 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ( $\text{He}^+$ )	$2,4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$
Магнитное поле	$B_0 = 200 \text{ Гс}$	200 Гс
Температура электронов	$T_{e^*} \sim 5 \div 10 \text{ эВ}$	10 эВ

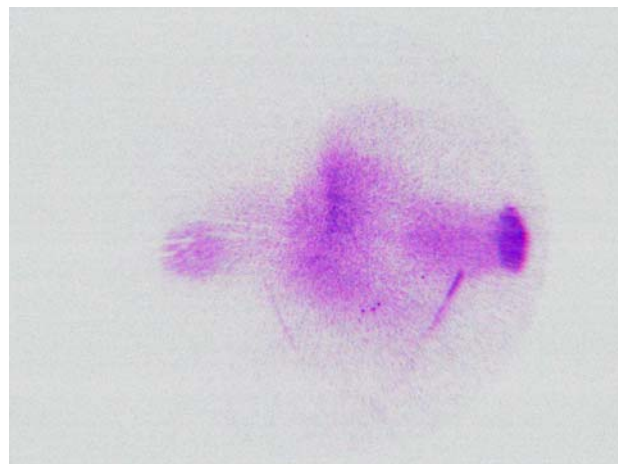
Сгусток Лазерной Плазмы (ЛП)	Обозначения и величина в эксперименте	В расчетах
<b>Масштабы и Скорости</b>		
Радиус диамагнитной каверны ЛП в ФП	$R^* = (3N_0/4\pi n^*)^{1/3} \approx 40$ см	-//-
Радиус диамагнитной каверны ЛП в вакуумном магнитном поле	$R_b = (3E_0/B_0^2)^{1/3} \approx 55$ см	-//-
Радиус торможения сферич. облака ЛП фоном по модели «снежного плуга»	$R_m = (3N_0^* \langle m/z \rangle / 4\pi n^* m^*)^{1/3} \approx 37$ см	-//-
Ларморовский радиус ионов ЛП и ФП (по $V_0$ )	$R_L \approx 21$ см и $R_L^* \approx 28$ см	-//-
Длина свободного пробега ионов ЛП в фоне (кулоновские столкновения)	$\lambda_i^{\min} \sim 500$ см	-//-
Скорость Альфвена в ФП	$C_A = V_0/(4\pi n^* m^*)^{1/2} \approx 44$ км/с	40 км/с
<b>Определяющие критерии подобия</b>		
Число Альфвена – Маха	$M_A = V_0/C_A \approx 3,2 (\geq 3)$	3,2
Параметр МЛМ-взаимодействия	$\delta_0 = R_*^2 / R_L R_L^* \approx 2,5 (> 1)$	2,5
Число Кнудсена	$Kn_i = \lambda_i^{\min} / R_* \sim 10 \gg 1$	-//-
Плазменное Бэга	$\beta_e = 8\pi n^* k T_{e^*} / B_0^2 \sim 0,2 \ll 1$	-//-

Из приведенных данных «Циркуля» можно оценить масштаб распространения ионов ЛП по X (горизонтально), как  $L_{nH} \approx 60$  см (для  $H^+$ ) на рис. 4, а и  $L_{nC} \approx 55$  см (для ионов  $C^{+3}$  из перезаряженных на ФП исходных ионов  $C^{+4}$  ЛП) на рис. 4, б, что примерно соответствует данным рис. 3. На рис. 5 представлены обобщенные дан-

ные ( $R-t$ ) диаграммы распространения фронтов возмущений полной концентрации (ФП+ЛП, измеряемой в экспериментах) и магнитного поля в ФП (см. примеры на рис. 6, а-с и 7, б), в сравнении с соответствующими данными численного моделирования по гибридной модели типа «Облако» [11].



а – фильтр  $H_\alpha$  (656,3 нм), #63(25.05.17),  $N_r = 930$



б – фильтр CIV (580,1 нм), #46(24.05.17),  $N_r = 952$

Рис. 4. Съемки ЭОПом свечения лазерной плазмы при взаимодействии с фоновой плазмой  $He^+$  в магнитном поле 200 Гс (слева – в линии  $H_\alpha$ , справа – в линии  $C^{+3}$ , в моменты времени  $t = 5,1$  и  $5$  мкс, соответственно). Пятна слева – лазерная мишень с выходной частью экрана ( $\varnothing 11,5$  см), в верхней части видны подводные кварцевые трубки зондов «Циркуля» разведенные в случае а) на 48,6 см, а в б) – на 27,8 см. Пятна справа – выход источника ФП

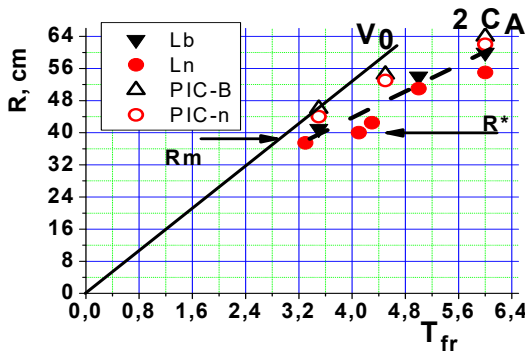


Рис. 5. Обобщенная ( $R-t$ ) диаграмма распространения фронтов  $n$  и магнитного поля  $B_z$  в эксперименте МЭГ-БУВ: Ln и Lb по данным электрических и магнитных зондов, в сравнении с результатами гибридных расчетов, соответственно: (PIC-n) и (PIC-B)

#### 4. Сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования бесстолкновительного взаимодействия на основе гибридных модели, особенности и общие масштабы фронта ( $C/\Omega_{pi}$ ) генерации различных БУВ, а также распространения ЛП

На рис. 6 представлены основные результаты гибридного моделирования (с параметрами

согласно данным в таблице) в сравнении экспериментальными распределениями основного поля  $B_z(x)$  на верхней строке, а также данными расчетов об ограниченной области ЛП – в нижней.

Отличительной особенностью расчетных данных по распределению различных ионов ЛП (на нижней строке рис. 6), является четко ограниченная область распространения тех или иных ионов ЛП, например, только до  $R = 44$  см для ионов  $C^{+3}$

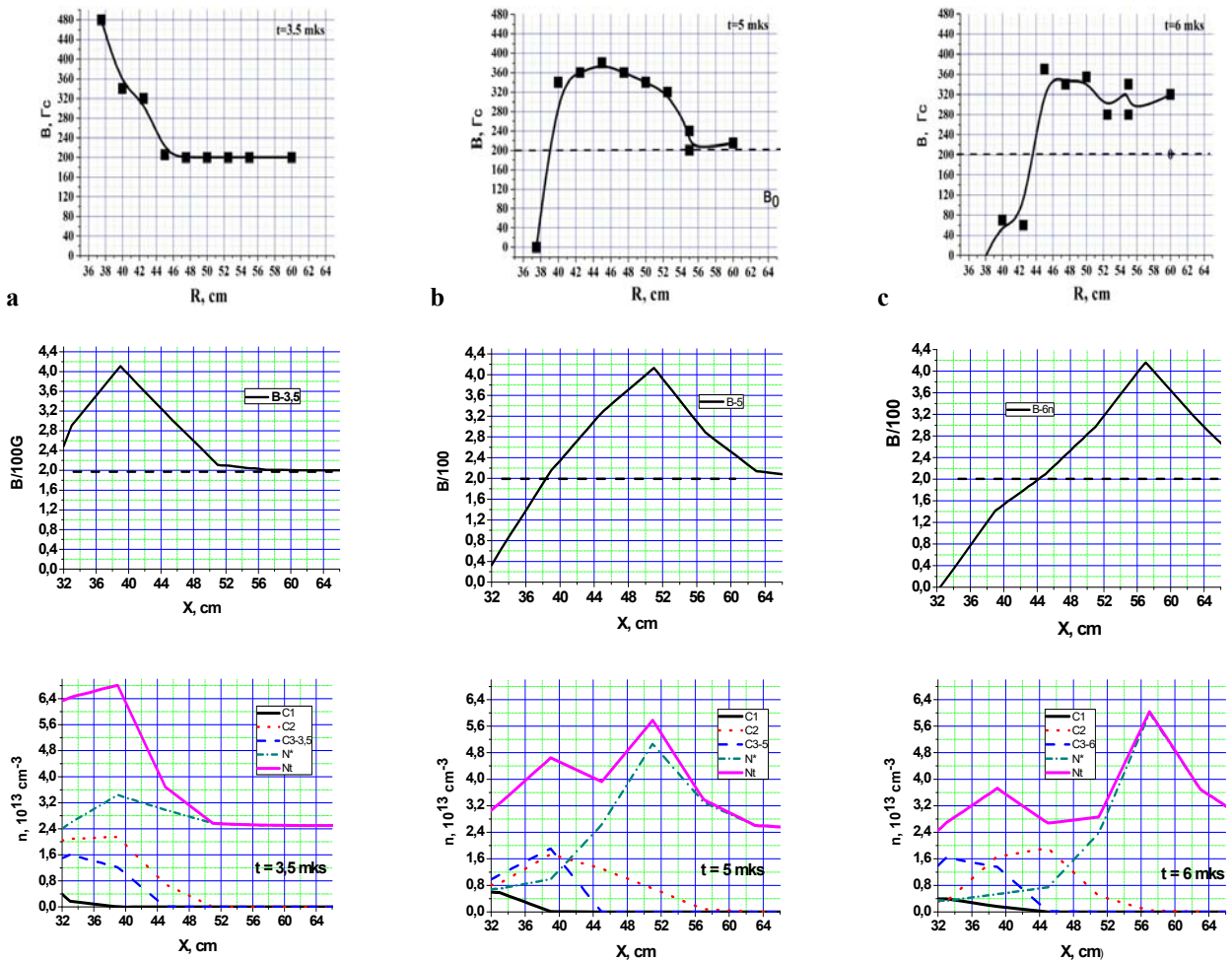
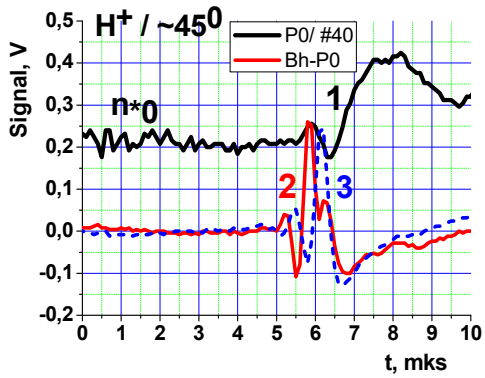
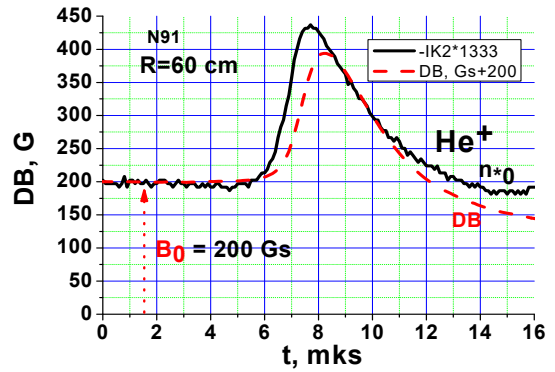


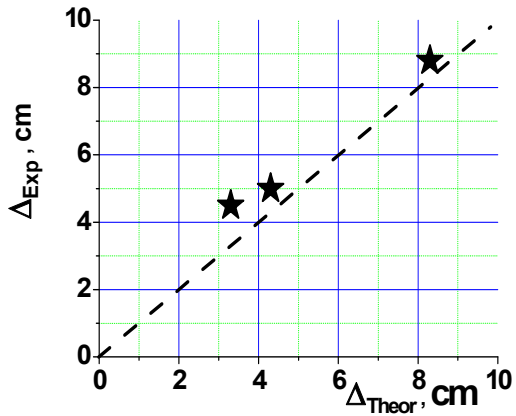
Рис. 6. Сводные данные эксперимента МЭГ-БУВ (верхняя строка a-b-c, для моментов времени 3,5; 5 и 6 мкс) и его моделирования (ниже, по 2D-гибридной модели типа «Облако» [11]) для распределения магнитного поля (средняя строка) и концентраций электронов всех компонентов: ФП – «N+», полной суммарной – (N<sub>t</sub>) и ЛП: C1 (H<sup>+</sup>), C2 (C<sup>+2</sup>) и C3 (C<sup>+3</sup>), с начальным %-содержанием (по количеству электронов) согласно данным в таблице



а



б



в

(или только до  $R \approx 40$  см для  $H^+$ ), в то время, как согласно предварительным спектроскопическим данным (рис. 3 и 4), оба этих типа ионов достигают расстояний вплоть до 50÷60 см. Одной из основных причин такого различия может быть несферическая геометрия разлета ЛП в эксперименте МАГ-БУВ, в отличие от некоторых других, более ранних [14] на стенде КИ-1. Для проверки, в настоящее время проводятся 3D-расчеты с облаками ЛП типа сгустков, как МАГ-БУВ. Наконец, приведенные на рис. 7 сводные данные об общих характеристиках формируемых на стенде КИ-1 с помощью ЛП-поршня, различных замагниченных БУВ показывает перспективность данного направления создания и исследования лабораторных БУВ, включая принципиальные вопросы состава ЛП.

## 5. Заключение

В работе представлены теоретическое обоснование и основные результаты нового МЛМ-эксперимента МЭГ-БУВ, как продолжения первых успешных опытов серии «БУВ» [15–20] по генерации лазерной плазмой Бесстолкновительных

Рис. 7. Общая зависимость (в) для ширины  $\Delta$  фронта различных БУВ, промоделированных на КИ-1: крайние левая и правая точки – это поперечные БУВ (в  $H^+$ - [15–17, 20] и, соответственно, в  $He^+$ -фоне/здесь на б), а средняя – Квази-Перпендикулярная (КП) БУВ [18,19] на рис. 7, а. На данном рис. 7, а, наряду с фронтом концентрации (1) представлены два ортогональных компонента (2, 3) магнитного поля вистлерного предвестника таких КП-БУВ, впереди  $n$ -фронта. По теории масштаб ионного скин-слоя  $\Delta_T = C/\Omega_{pi}$ , а в опытах, как  $\Delta_E \approx V_S * \tau_f$  (по скорости фронта  $V_S$  и его ширине  $\tau_f$ )

Ударных Волн (БУВ) в замагниченной фоновой плазме за счет Магнитного Ламинарного Механизма [2, 3], обеспечивающего бесстолкновительное взаимодействие взаимодействующих сверхальфеновских плазменных потоков лазерной и фоновой плазмы в поперечном магнитном поле за счет вихревых электрических полей.

Работа была выполнена в рамках программы № 0307-2017-0015 Фундаментальных исследований ИЛФ СО РАН и Проекта 0307-2018--0022 Программы «Экстремальное лазерное излучение: физика и фундаментальные приложения» Президиума РАН на 2018 г. Работа была частично поддержана в рамках Программы Президиума РАН «Фундаментальные основы технологий двойного назначения в интересах национальной безопасности», по Проекту. № 0307-2018-0010, а также по Проекту РФФИ № 18-32-00029.

## Список литературы

1. Paul J. W. M., et al. Experimental study of collisionless shock waves // Proc. IV Int. Conf. on Plasma Phys. and Control. Nucl. Fus. Res. Madison. 1971. Vol. III. P. 251–263.

2. Голубев А. И., Соловьев А. А., Терехин В. А. О бесстолкновительном разлете ионизованного облака в однородную замагниченную плазму // ПМТФ. 1978, № 5. С. 33–37.
3. Башурин В. П., Голубев А. И., Терехин В. А. О бесстолкновительном торможении ионизированного облака, разлетающегося в однородную замагниченную плазму // ПМТФ. 1983, № 5, С. 10–17.
4. Longmire C. L. Rand Corporation Report, Notes on Debris-Air-Magnetic Interaction, RM-3386-PR (Santa-Monica, 1963), 8 p.
5. Wright T. P. Early time model of laser plasma expansion // Physics of Fluids. 1971. Vol. 14, N 9. P. 1905–1910.
6. Захаров Ю. П., Пономаренко А. Г. Бесстолкновительное взаимодействие потоков лазерной плазмы с замагниченной плазменной средой // В сборнике научных трудов ИТПМ СО АН: «Взаимодействие лазерного излучения с веществом», Новосибирск, 1980. С. 4–39.
7. Spicer D. S., Clark R. W., Maran S. P. A model of the pre-Sedov expansion phase of Supernova remnant-ambient plasma coupling and X-ray emission from SN 1987A // Astrophysical Journal. 1990. Vol. 356. Pt 1. P. 549–571.
8. Антонов В. М., Башурин В. П., Голубев А. И., Жмайло В. А., Захаров Ю. П. и др. Экспериментальное исследование бесстолкновительного взаимодействия сверхальфвеновских взаимодействующих потоков плазмы // ПМТФ. 1985, № 6. С. 3–10.
9. Антонов В. М., Башурин В. П., Голубев А. И., Жмайло В. А., Захаров Ю. П. и др. Исследование взаимодействия потоков бесстолкновительной плазмы при больших числах Альфвена – Маха // Доклады АН СССР. 1986. Т. 289, № 1. С. 72–75.
10. Zakharov Yu. P., Orishich A. M., Ponomarenko A. G., Posukh V. G., Snytnikov V. N. Laboratory simulation of collisionless coupling between Supernova remnants and magnetized interstellar medium // Proceed. Joint Varenna-Abastumani Intern. School & Workshop on «Plasma Astrophysics» (May 19–28, 1986, Sukhumi, USSR), ESA Vol. SP-251. P. 37–40.
11. Dudnikova G. I., Orishich A. M., Ponomarenko A. G., Vshivkov V. A., Zakharov Yu. P. Laboratory and computer simulations of wave generation processes in non-stationary astrophysical phenomena // Proc. Joint Varenna-Abastumani-ESA-Nagoya-Potsdam Workshop on «Plasma Astrophysics»: ESA SP-311, Telavi (USSR), 1990. P. 191–194.
12. Biskamp D. Collisionless shock waves in plasmas // Nuclear Fusion, Vol. 13, N 5. P. 719–740.
13. Winske D., Gary S. P. Hybrid simulations of debris-ambient ion interactions in astrophysical explosions // Journal of Geophysical Research. 2007. Vol. 112. A10303. 11 p.
14. Zakharov Yu. P. Collisionless laboratory astrophysics with lasers // IEEE Transactions on Plasma Science. 2003. Vol. 31. P. 1243–1251.
15. Zakharov Yu. P., Ponomarenko A. G., Terexhin V. A. et al. Large-scale laboratory simulation of space collisionless shocks in magnetized background by using laser-produced plasma blobs of kJ-range effective energy // The Six International Symposium «Modern Problem of Laser Physics» (Novosibirsk, ILP. 2013. P. 193–194).
16. Zakharov Yu. P., Ponomarenko A. G., Terexhin V. A. et al. Generation of collisionless shocks by laser-plasma piston in magnetized background: Experiment «BUW» // Plasma Physics and Technology. 2014. Vol. 1. P. 163–165.
17. Захаров Ю. П., Пономаренко А. Г., Терехин В. А. и др. Генерация сгустков лазерной плазмы с высокой эффективностью концентрации энергии для лабораторного моделирования Бесстолкновительных Ударных Волн в замагниченной космической плазме // Квантовая электроника. 2016. Т. 46, № 5. С. 399–405.
18. Zakharov Yu. P., Ponomarenko A. G., Terexhin\* V. A. et al. Simulation by laser plasma blobs of the coronal mass ejection impact onto Earth's magnetosphere at presence of interplanetary quasi-perpendicular Collisionless Shocks // The VII International Symposium «Modern Problem of Laser Physics» (Novosibirsk, ILP. 2016. P. 254–255).
19. Zakharov Yu. P., Ponomarenko A. G., Terexhin\* V. A., Golubev\* A. I., Antonov V. M., Boyarintzev E. L., Vchivkov K. V., Melekhov A. V., Posukh V. G., Prokopov P. A. Generation of quasi-perpendicular Collisionless Shocks by Laser-Produced Plasma to simulate the effects of super-compression of the Earth's magnetosphere // Journal of Physics Conference Series. 2017. Vol. 927, #012078.
20. Захаров Ю. П., Терехин\* В. А., Пономаренко А. Г., и др. Численное и лабораторное моделирование генерации бесстолкновительных ударных волн лазерной плазмой // Проблемы Физики Высоких Плотностей Энергии. XVII Харитоновские Тематические Научные Чтения. Устный доклад 19 апреля 2016 г. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2016. Т. 1. С. 374–381.
21. Constantin C., Gekelman W., Pribyl P., Everson E., Schaeffer D., Winske D. et al. Collisionless



interaction of an energetic laser produced plasma with a large magnetoplasma // *Astrophysics and Space Science*. 2009. Vol. 322, N 1–4. P. 155–159.

22. Niemann Ch., Bondarenko A. S., Constantin C., Gekelman W., Flippo K. A., Winske D. et al. Collisionless Shocks in a Large Magnetized Laser-Plasma Plume // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2011, Vol. 39, N 11. P. 2406–2407.

23. Schaeffer D. B., Everson E. T., Winske D. et al. Generation of magnetized collisionless shocks by a novel, laser-driven magnetic piston // *Physics of Plasmas*. 2012. Vol. 19, N 7. #070702.

24. Clark S. E., Winske D., Schaeffer D. B. et al. Hybrid simulation of shock formation for super-Alfvénic expansion of laser ablated debris through an ambient, magnetized plasma // *Physics of Plasmas*. 2013. Vol. 20, N 8. #082129.

25. Schaeffer D. B., Winske D., Larson D. J., Cowee M. M., Constantin C. et al. On the generation of magnetized collisionless shocks in the large plasma

device // *Physics of Plasmas*. 2017. Vol. 24, N 3. #041405.

26. Schaeffer D. B., Fox W., Haberberger D., Fiksel G., Bhattacharjee A. et al. High-Mach number, laser-driven magnetized collisionless shocks // *Physics of Plasmas*. 2017. Vol. 24, N 12. #122702.

27. Meinecke J., Miniati F., Bell A. R., Bingham R., Woolsey N. C., Gregori G. et al. Turbulent amplification of magnetic fields in laboratory laser-produced shock waves // *Nature Physics*. 2014. Vol. 10. P. 520–524.

28. Morita T., Sakawa Y., Kuramitsu Y. et al. High Mach-number collisionless shock driven by a laser with an external magnetic field // *EPJ Web of Conferences*. 2013. Vol. 59, #15004, 5 P.

29. Ishii K., Tanabe T., Lomsadze R. et al. Charge-Changing Cross Sections in Collisions of  $Cq^+$  ( $q = 2-5$ ) with He and  $H_2$  at Energies below 750 eV/u // *Physica Scripta*. 2001. Vol. 92. P. 332.