

# ЧИСЛЕННОЕ И ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМОЙ

## NUMERICAL AND LABORATORY SIMULATIONS OF THE GENERATION OF COLLISIONLESS SHOCK WAVES BY LASER PRODUCED PLASMA

Ю. П. Захаров<sup>1</sup>, В. А. Терехин<sup>2</sup>, А. Г. Пономаренко<sup>1</sup>, В. Г. Посух<sup>1</sup>, В. Н. Тищенко<sup>1</sup>,  
П. А. Прокопов<sup>1</sup>, К. В. Вшивков<sup>1</sup>

Yu. P. Zakharov<sup>1</sup>, V. A. Terekhin<sup>2</sup>, A. G. Ponomarenko<sup>1</sup>, V. G. Posukh<sup>1</sup>, V. N. Tishchenko<sup>1</sup>,  
P. A. Prokopov<sup>1</sup>, K. V. Vchivkov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГУН Институт Лазерной Физики СО РАН

<sup>2</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Нижегородская область, пр. Мира, 37, 607188, Россия

<sup>1</sup>FSIS Institute of Laser Physics SB RAS

<sup>2</sup>FSUE All-Russian Research Institute of Experimental Physics

В настоящее время на многих установках со сверхмощными лазерными системами проводятся интенсивные исследования по генерации Бесстолкновительных Ударных Волн (БУВ) различного типа. В данной работе обсуждается постановка и приводятся данные первых экспериментов по генерации поперечной БУВ Лазерной Плазмой (ЛП) в замагниченной Фоновой Плазме (ФП) на модельном стенде КИ-1 ИЛФ с CO<sub>2</sub>-лазером кДж-уровня. Генерация БУВ обусловлена Магнитным Ламинарным Механизмом (МЛМ) бесстолкновительного взаимодействия плазменных потоков (ЛП с ФП), разработанным во ВНИИЭФ (1978 и 1983 г.) и впервые исследованным в опытах ИЛФ (1985 г.). В последние годы, в результате достигнутой эффективной энергии ЛП до кДж и использования ФП высокой концентрации  $\sim 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  на размерах  $\sim 1 \text{ м}$ , впервые удалось сформировать БУВ с магнито-звуковым числом Маха  $M_f \approx 1,8$  и нагревом электронов в  $\sim 1,5$  раза на масштабе фронта  $\sim C/\omega_{pe}$ .

At the present a very intensive studies on generation of different types of Collisionless Shock Waves (CSW) are carried out at the lot of super high-power laser facilities. In the given work we discuss formulation of problem and present the first successful experimental results at KI-1 model facility of ILP, on transverse CSW generation by Laser produced Plasma (LP) in the magnetized Background Plasma (BP). It became possible due to previous researches of Magnetic Laminar Mechanism (MLM, of LP-BP interaction) developed at VNIIEF (1978) and firstly tested in the ILP experiments (1985) with a CO<sub>2</sub> –laser of kJ-level. Recently, as a result of production of LP with a large effective energy  $\sim \text{kJ}$  and using of maximal size  $\sim 1 \text{ m}$  of BP with high density  $\sim 3 \cdot 10^{13} \text{ 1/cc}$ , a CSW with magneto-sonic number  $M_f \approx 1,8$  was generated for the first time, with the electron heating by factor 1,5 at the front scale  $\sim C/\omega_{pe}$ .

### 1. Введение

С самого начала официального развития [1, 2] в середине 90-х (а возможно [3], с конца 80-х) нового направления фундаментальных исследований «Лабораторная Астрофизика» (возникшего на стыке Программ создания сверхмощных лазеров, Лазерного Термоядерного Синтеза и Плазменной Астрофизики [3]) и вплоть до настоящего времени является лабораторное моделирование космиче-

ских БУВ с различными числами Альфвена – Маха  $M_A$ , вплоть до  $M_A \geq (m/m_e)^{1/2}$ . Для этого проводятся различные эксперименты с Лазерной Плазмой (ЛП), в том числе на многих мощных лазерных установках мирового уровня, как с магнитным полем  $B_0$ , например, VULCAN [5], так и без него (GenASIS в [4] и другие, типа «Omega»), как правило, при начальных скоростях фронта ЛП до  $V_0 \sim 1000 \text{ км/с}$ , в рамках программы High Energy Density Physics (HEDP [4]). В настоящее время, по этой программе было обнаружено много

новых процессов бесстолкновительного взаимодействия потоков плазмы и формирования соответствующих БУВ, в первую очередь, за счет неустойчивости [4] Вейбеля (без внешнего поля  $B_0$ ), принципиально важной для астрофизических БУВ и ускорения частиц на них. Однако, большинство космофизических взрывных явлений (выбросы на Солнце или активные эксперименты в ионосфере) характеризуются умеренными начальными числами Маха-Альфвена  $M_{A0}$  (по  $V_0$ )  $\leq 10$  и предполагаемой существенной ролью магнитного поля  $B_0$  в различных практически важных задачах, связанных с БУВ.

Несмотря на значительный интерес к лабораторному моделированию таких замагниченных БУВ, практически с начала исследования и применения ЛП в экспериментах [6], вплоть до настоящего времени такого типа БУВ в лабораторных условиях не были получены. А в настоящее время, только на лазерном модельном стенде КИ-1 ИЛФ СО РАН [3, 7] и крупнейшей модельной установке LAPD в США (длиной  $\sim 20$  м) проводятся целенаправленные исследования по этой теме в последние годы [8, 9, 10–12]. В ИЛФ СО РАН постановка этих экспериментов осуществляется в сотрудничестве с ВНИИЭФ, где были впервые разработаны теория и гибридная модель бесстолкновительного взаимодействия сферического облака плазмы с фоном [13], а в США – в сотрудничестве LAPD с Лабораторией Лос-Аламоса, где проводятся соответствующие расчеты по гибридной модели [14, 15] в цилиндрической геометрии, а также дополнительные эксперименты с  $\text{CO}_2$ -лазером «Trident» кДж-класса [8].

## 2. Постановка экспериментов по моделированию замагниченных БУВ на лазерном стенде КИ-1 ИЛФ СО РАН. Требуемые критерии подобия задачи и методы создания облаков ЛП большой эффективной энергии $\sim$ кДж

Постановка экспериментов серии «БУВ» [10–12] на модельном стенде КИ-1 ИЛФ проводилась на основе анализа физических процессов т. н. Магнитного Ламинарного Механизма (МЛМ) взаимодействия облака ЛП с Фоновой Плазмой (ФП) по модели ВНИИЭФ [13]. Ее основу составляет критерий  $\delta$  эффективности МЛМ-передачи энергии  $E_0$  облака фону ( $E_*$ ), в виде простого соотношения  $E_{*max} \approx \delta * E_0$  (при  $\delta < 1$ ), где МЛМ-параметр  $\delta = R_*^2 / R_L R_L^*$  определяется ларморовскими радиусами ионов ЛП и ФП,  $R_L$  и  $R_L^*$ , соответст-

венно (рассчитанными по скорости  $V_0$ ), а масштаб  $R_* = (3N_0 / 4\pi n_*)^{1/3}$  определяет максимальный радиус диамагнитной каверны сферического облака ЛП в фоне с концентрацией  $n_*$  (при  $M_{A0} > 1$ , т. е. в случае возможной БУВ). За счет вытеснения магнитного поля, на границе каверны возникает вихревое электрическое поле  $E_\varphi$  ( $\sim V_0 B_0 / C$ ), вдоль которого ускоряются ионы ФП, в то время как ионы ЛП замедляются в своем ларморовском вращении (противоположном  $E_\varphi$ ). 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 [13]), главное из которых – величина МЛМ-параметра  $\delta \geq 1$ . С учетом наиболее интересного диапазона по  $M_{A0} \geq 5 \div 7$ , таких значений  $\delta$  можно достигнуть только за счет достаточно большой энергии  $E_0 = 0,3 N_0 (m/z) * V_0^2$  сферического облака ЛП. Точнее, за счет большого  $N_0$  – полного количество 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 [7,12]), поэтому и ларморовские радиусы ионов в  $\delta$  не могут быть меньше определенных значений. В итоге, проведенный анализ [7,12] показал, что для экспериментов в «обычном» лабораторном диапазоне параметров крупных плазменных установок (с полями до кГс и концентрацией фона  $\sim 3 * 10^{13}$  см $^{-3}$  в объеме  $\geq 1$  м $^3$ ), для достижения требуемых  $\delta \geq 1$  при  $M_{A0} \geq 7$ , необходимо создать сферическое облако ЛП с энергией  $E_0 \geq 1$  кДж. Отметим, что полу-качественная физическая модель МЛМ-взаимодействия была рассмотрена еще в 60-х годах в США [16, 17], однако, в дальнейшем там не получила развития, так что, в законченном физико-математическом виде модель МЛМ была завершена только в ВНИИЭФ [13].

Именно за счет использования данных этой МЛМ-модели были выбраны параметры опытов на стенде КИ-1 и получены первые экспериментальные подтверждения [18,19] эффективности МЛМ-взаимодействия еще в 80-х годах, в экспериментах при небольших значениях  $\delta \sim 0,3$  и  $R_* \approx 20$  см (при кинетической энергии  $E_0 \approx 45$  Дж квази-сферического облака ЛП). В результате взаимодействия формировалась уединенная быстрая магнитозвуковая волна с  $M_f \sim 1$  (в  $\text{H}^+$ -фоне,  $n_* \approx 2 \div 3 * 10^{13}$  см $^{-3}$ ), на радиусах до  $D_* \sim 30 \div 40$  см поперек поля от центра камеры, где устанавливалась [18] капролоновая нить-мишень  $\varnothing 0,27$  мм (вдоль поля  $B_0$ ). Генерация таких облаков производилась за счет ее

двух-стороннего облучения лучами  $\text{CO}_2$ -лазера «ЛУИ-2м» мкс-диапазона (с пиком  $\tau \sim 100$  нс), с энергией  $Q$  до 1 кДж и пучками  $\varnothing$  4 мм в области мишени. Предполагалось, что созданные таким образом осесимметричные облака ЛП будут заведомо максимально эффективно вытеснять магнитное поле  $B_0$  (для действия МЛМ), без паразитных эффектов поляризации и дрейфа поперек  $B_0$  несимметрично разлетающихся сгустков ЛП. Это удалось реализовать (сначала в вакуумном магнитном поле [7]) и впервые получить экспериментальные данные о МЛМ, хорошо соответствующие расчетным [18,19].

В последние годы [10–12], 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 ~50 % [12]). В результате, было установлено, что при разлете ЛП в оптимальном угле  $\Delta\Omega \sim 1$  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  $N_{0e}$  и  $E_{0e} \approx 4\pi E_k$ . Именно они характеризуют эффект выигрыша от применения направленно разлетающихся сгустков ЛП (от плоских мишеней), т.к. в этих заданных направлениях можно сконцентрировать имеющиеся в распоряжении реальные кинетическую энергию  $E_k$  сгустка и полное число электронов  $N_e$  в нем, «растягивая», например, требуемый размер  $R^*$  в  $(4\pi)^{1/3} \sim$  в 2 раза, для увеличения значения МЛМ-параметра  $\delta$  и достижения, таким образом, условия формирования БУВ, при  $\delta \geq 1$ .

В случае КИ-1, например, это позволило наконец-то реализовать вариант [7] эксперимента по БУВ, с расположением плоской мишени на краю столба ФП (Рис. 1), т.е. почти у стенки цилиндрической камеры КИ-1 ( $\varnothing 1,2$  м и длиной 5 м), на торце которой располагался источник ФП типа  $\theta$ -пинча. За счет этого варианта, общий размер  $D^*$  зоны генерации (на масштабах каверны  $X \sim R^*$ ) и формирования БУВ за каверной, на масштабе ларморовского радиуса ионов фона  $R_{Ld}^*$  (по скорости  $V_d$  и сжато [9] магнитному полю  $B_d$  возмущений в ФП), был увеличен до рекордной величины  $D^* \approx 80$  см.

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

Необходимая для формирования БУВ диамагнитная каверна больших масштабов  $R_c \sim 50$  см

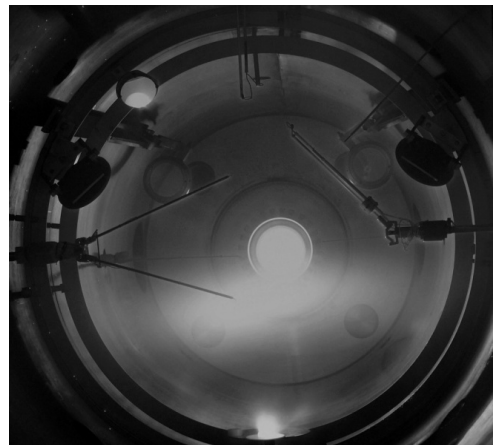
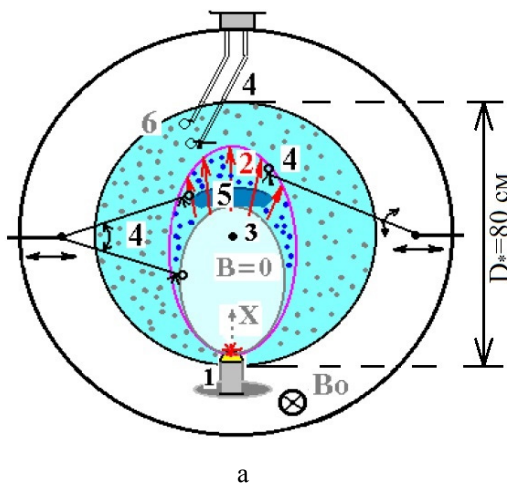


Рис. 1а. Принципиальная схема эксперимента «БУВ» на стенде КИ-1 ИЛФ в сечении камеры стенда ( $\varnothing 120$  см) с магнитным полем  $B_0$ : 1 – мишень на изоляторе; 2 – фронт ЛП; 3 – центральная  $Z$ -ось камеры, совпадающая с осью  $\theta$ -пинча; 4 – элементы различных зондовых диагностик; 5 – область взаимодействия плазм ЛП и фона; 6 – граница фоновой плазмы.  $X$  – нормаль к мишени в области диамагнитной каверны ЛП ( $B = 0$ ); б – фото в момент разлета ЛП в ФП

(вдоль и поперек нормали к мишени), была впервые получена (рис. 2) при разлете сгустков ЛП с числами  $M_{A0} = V_0/C_A \approx 6$  в ходе экспериментов ИЛФ «БУВ» [10–12], с концентрацией  $n_* \approx (3\div 4) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  водородной фоновой плазмы с температурой электронов  $T_{e*} \sim 10 \text{ эВ}$ .

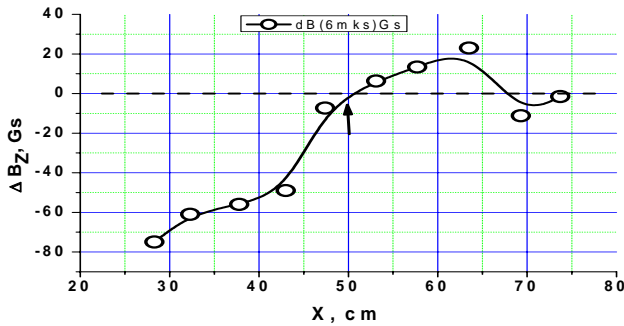


Рис. 2. Радиальная структура диамагнитной каверны, с границей (показано стрелкой) на  $R_c \approx 50 \text{ см}$  дальше расчетного значения (на  $R_* \approx 35 \text{ см}$ ) из-за эффекта смещения ФП [18]. Начальное поле  $B_* \approx 80 \text{ Гс}$  в фоновой  $H^+$ -плазме с плотностью  $n_* \approx 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , в момент  $t = 6 \text{ мкс}$  (максимального размера каверны, области где  $\Delta B_z < 0$ )

На рис. 3 представлены основные результаты экспериментов на стенде КИ-1 для различных условий, в частности, для случая «свободного» разлета ЛП в отсутствие магнитного поля  $B_0$  в вакууме (кривая 1) и в немагнитиченной ФП (кривая 2). Динамика тока  $J_{p0}(V)$ , собираемого тонким цилиндрическим электродом Ленгмюровского зонда (см. Приложение) показывает близкое к точному поведение полной концентрации плазмы  $n(t)$ , т.е. сумме концентраций ЛП и ФП, что подтверждается, в частности, сравнением с данными численного моделирования [18–20]. В отличие от довольно гладких кривых 1 и 2, на сигнале  $J_{p0}$  (кривая 3) данного зонда на расстоянии  $X = 75 \text{ см}$ , в замагниченной ФП наблюдается сильный скачок концентрации и магнитного поля (кривая 4), с крутым фронтом ( $\Delta t \leq 0,5 \text{ мкс}$ ) и заметным торможением при распространении вдоль оси  $X$  (рис. 4). Отметим, что начальное внешнее (вакуумное) магнитное поле  $B_0 = 110 \text{ Гс}$  вытесняется диамагнитным фоном до величины  $B_* \approx 80 \text{ Гс}$ .

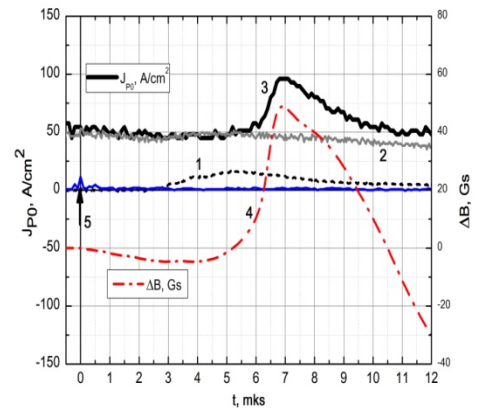


Рис. 3. Динамика потока  $nV \propto J_{p0}$  (1) Лазерной Плазмы (ЛП) и концентрации  $n^* \propto J_{p0}$  (2, 3) Фоновой Плазмы (ФП) на расстоянии  $X = 75 \text{ см}$  от мишени, а также возмущений магнитного поля (4) при их взаимодействии. (5) момент запуска лазера. (1) только ЛП в вакууме (без поля), (2) ЛП с ФП (без поля), (3 и 4) ЛП и ФП в магнитном поле

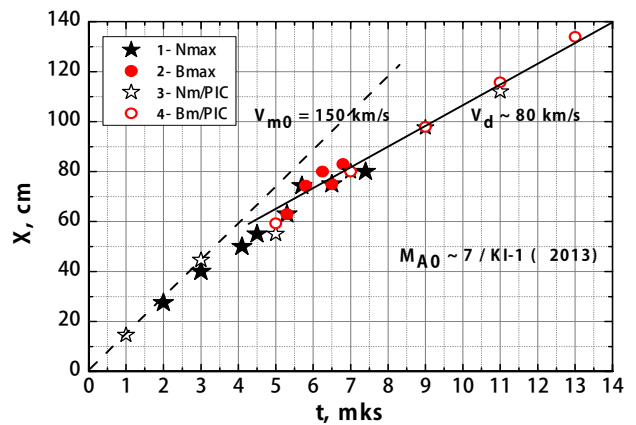


Рис. 4. Объединенная  $R-t$  диаграмма движения максимумов полной концентрации (Nmax) и магнитного поля (Vm) при взаимодействии Лазерной Плазмы (ЛП) с замагниченной фоновой плазмой.  $V_{m0}$  – начальная скорость максимума концентрации ЛП,  $V_d$  – средняя скорость по обоим максимумам за расчетным радиусом  $R_m$  ( $\approx 50 \text{ см}$ ) газодинамического торможения ЛП. Здесь приведены данные, как лабораторного моделирования (точки 1 и 2), так и соответствующих гибридных расчетов по SOME (точки 3 и 4).

В результате, в условиях разлета ЛП с  $V_0 \approx 180 \text{ км/с}$ , при расчетных величинах радиусов Лармора ионов облака  $R_L \approx 56 \text{ см}$  и фона  $R_L^* \approx 23 \text{ см}$ , впервые при значении  $\delta \approx 1$ , вдоль нормали к мишени  $X$  и вне каверны, наблюдалось (рис. 3, 4) сильное возмущение ФП, распростра-

няющееся со сверх-магнитозвуковой скоростью  $V_d \approx 75\div 80$  км/с на расстояния до 80 см. Зарегистрированные значительные скачки концентрации  $n^*$  и магнитного поля с шириной фронта  $\Delta \approx \Delta t^* V_d \approx 3\div 4$  см ( $\sim C/\omega_{pi}$ ) соответствуют до-критической магнитозвуковой Бесстолкновительной Ударной Волне, возможно, в специфической «Solitary» [22] форме (ввиду очевидного отсутствия стационарного состояния «за фронтом», в связи со сферической геометрией задачи и сравнимых масштабов  $C/\omega_{pi}$  и  $R^*$ ). Действительно, помимо малой ширины фронта и примерно соответствующих соотношениям Рэнкина – Гюгонно [15, 21] скачков сжатия  $n^*$  и  $B$  (в  $\approx 2$  раза и в 1,65÷1,85 раза, соответственно), анализ электронной ветви ВАХ выявил заметный нагрев электронов фона (с 7 до 11 эВ), близких к расчетному скачку (в 1,7 раз), а данные ионной ВАХ [12] в максимуме скачков удовлетворительно соответствовали исходному ионному составу ФП, с  $\langle m^* \rangle \sim 1$  а.е.м. Таким образом, сформированное лазерной плазмой на стенде КИ-1 сильное возмущение фоновой плазмы, по совокупности признаков, является впервые полученной в лаборатории моделью космических БУВ, создаваемых сгустками взрывающейся плазмы, в нашем случае, до-критической перпендикулярной магнитозвуковой БУВ с числом Маха до  $M_f \approx 1,8\div 2$ . Данное число определяется через отношение скорости максимума возмущения

$V_d \approx 80\div 90$  км/с к скорости быстрого магнитного звука  $C_f \approx 44$  км/с. А критическое число Маха в данном случае, БУВ поперек поля в фоне с  $\beta^* = 8\pi n^* k T_e^* / B^2 \approx 1,3$ , составляет [23] до  $M_{f1} \approx 2,2$ . В настоящее время анализируются возможности постановки на стенде КИ-1 экспериментов по моделированию сверх-критических БУВ с  $M_f > M_{f1}$ , в частности, в рамках завершения программы КИ-1 по моделированию эффектов сверх-сжатия магнитосферы Земли за счет формирования квази-перпендикулярных БУВ, налетающих на модель магнитосферы с соответствующим наклоном диполя ( $\sim 60^\circ$ ) к магнитному полю  $B_0$  (или к оси камеры).

Отметим, что зарегистрированное торможение в 2 раза (рис. 4.) максимума концентрации ЛП вблизи ожидаемой границы каверны  $R^* \approx 35$  см (и радиуса газодинамического торможения  $R_m = [3N_0(m/z)/4\pi n^*(m^*/z^*)]^{1/3} \approx 50$  см), является действительно бесстолкновительным. Обычные ион-ионные ( $H^+ \rightarrow H^{*+}$ ) кулоновские столкновения дают длину свободного пробега  $\lambda_{i-i^*} \approx 300$  см, в то же время возможно более частые ион-электронные столкновения дают  $\lambda_{i-e^*}$  (см) =  $3m_e m V_m V_{te}^3 / 16\pi^{1/2} \Lambda e^4 Z^2 n_e \approx 6 \cdot 10^7 A_Z V (\text{см/с}) T_e^{3/2} (\text{эВ}) / Z^2 n_e (\text{см}^{-3}) \sim 10^3$  см (здесь  $\Lambda \approx 10$  Кулоновский логарифм). Тогда, имеем все достаточно большие длины пробега  $\lambda \gg R_m (\gg \Delta)$ , даже в худшем случае  $H^+$  ионов ЛП

	<b>ЛАРД/План [9] /2016</b>		<b>КИ-1 [10-12] /2013-16</b>
	$(Q = 500$ Дж, фокус. в $\sim 1$ мм)		$(Q = 250$ Дж, фокус. $\sim 25$ мм)
Энергия лазерной плазмы $E_k$ /ионы	$\sim 50$ Дж (С-мишень/ $C^{+4}$ ?)		$\sim 100$ Дж ( $C_2H_2/H^+, C^{+3}, C^{+2}$ )
Эффективная энергия $E_{0e} \sim 10 E_k$	$\sim 300$ Дж		$\sim 200$ (до 1000) Дж
Эффективное число электронов, $N_{e0}$	$\sim 10^{18}$		$\sim 5 \cdot 10^{18}$
Масса сгустка $M_0 = N_{e0} \langle m/z \rangle, g$	$4 \cdot 10^{-6}$		$2 \cdot 10^{-5}$
Скорость фронта $V_0$ , км/с	500 (500)		180
Магнитное поле $B_0$ , Гс	<b>275 G – А (500 G – В)</b>		80
Концентрация фона $n^*$ , см $^{-3}$	$2 \cdot 10^{13}$		$3 \cdot 10^{13}$
(состав фона / размер системы $D^*$ )	He $^+$ (H $^+$ )/ $\sim 50$ см		(H $^+$ / $\sim 85$ см)
МГД-торможение фоном на радиусе $R_m = (3M_0/4\pi n^* m^*)^{1/3}$ , см	21 см (30)		50 см
Масштаб каверны $R^* = (3N_{e0}/4\pi n^*)^{1/3}$	<u>23,2 см</u>		<u>35 см</u>
Лармор $R_{LH}$ ионов облака ( $\propto V_0$ )	54,5 см (30)		56 см ( $\langle m/z \rangle \sim 2,5$ а.е.м.)
Лармор $R_{L^*}$ ионов фона ( $\propto V_0$ )	73 см (10)		23 см
<b>В результате:</b>	<b>Режим А</b>	<b>Режим В</b>	<b>Оптимум:</b>
МЛМ-критерий $\delta = R^*/R_L R_{L^*}$	<b>0,14 &lt; 1</b>	<b>(<math>\delta \approx 2</math>)</b>	<b><math>\delta \sim 1</math></b>
Число Альфвена – Маха $M_{A0} = V_0/C_a$	<b><math>M_{A0} \approx 7,5 &gt; 1</math></b>	<b>(<math>M_{A0} \approx 2</math>)</b>	<b><math>M_{A0} \approx 6</math></b>



с  $A_z = 1$  а.е.м., скоростью максимума концентрации  $V_m \approx 1,5 \cdot 10^7$  см/с (и  $Z = 1$ ). Для сравнения укажем, что ни один из недавних качественно подобных ЛП-экспериментов по генерации БУВ, проведенных в США [8, 9 и др.], до сих пор не имел реальных положительных результатов, в основном, по причине недостатка установок с большими вакуумными объемами и плотной фоновой плазмой, чтобы обеспечивать масштабную магнитную каверну с  $R_*$  до 1 м. Вероятно, что даже после запуска в ближайшее время кДж-лазера для этих целей (см. табл.), существенного прогресса сразу не будет, до тех пор, пока не будут правильно учтены основы модели и результаты расчетов ВНИИЭФ по Магнитному Ламинарному Механизму [13] бесстолкновительного взаимодействия, а также правильно учтены особенности формирования сгустков ЛП [12].

В таблице приведены основные параметры экспериментов на **КИ-1** ИЛФ и **LAPD (USA)**.

Это также следует из большой серии расчетов и подробного анализа их результатов в открытом отчете D. Winske [15], именно с точки зрения формирования БУВ за счет МЛМ. В результате, D. Winske, как известный специалист по физике и расчетам БУВ, на основе проведенного анализа нашел требуемые параметры эксперимента на LAPD:  $E_0 \sim 50\text{--}100$  Дж,  $V_0 \sim 250\text{--}500$  км/с ( $H^+$ ,  $C^{+4}$ ),  $B_0 \sim 500\text{--}700$  Гс и фон с  $n_* \sim 2 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$  ( $H^+$  или  $He^+$ ) в столбе диаметром  $\varnothing \sim 50$  см. Эти параметры и МЛМ-критерий  $\delta \sim 1$  при  $R_* \sim 16$  см, могут быть достигнуты на LAPD в 2016 г., после запуска кДж-лазера (Raptor на Nd) и модернизации источника фона с LaB6-катодом большого диаметра, однако только лишь при  $M_{A0} \leq 2$  (см. табл. 1, режим В), что, по-видимому, недостаточно для формирования БУВ, по крайней мере, за счет МЛМ. В другом режиме А, даже при соответствующем наборе параметров (по  $M_{A0} \approx 7,5$ ) для генерации БУВ, они не могут быть получены, вследствие малой величины МЛМ-критерия  $\delta \sim 0,1$  ( $\ll 1$ ).

В целом, современное состояние проблемы генерации лабораторных БУВ за счет инжекции сгустков ЛП в замагниченную ФП, может быть в весьма грубом приближении отображено на плоскости в 2-мерных координатах (главных критериях подобия задачи:  $M_{A0}$  и  $\delta$ , см. рис. 5, ранее рассмотренных во ВНИИЭФ, а впоследствии, при анализе обобщенных данных модельных экспериментов на стенде КИ-1 [19]. На самом деле, важное значение могут иметь и другие критерии задачи, такие, например, как плазменное бэта ФП  $\beta_*$  или сложный ионный состав [24] ЛП, с ионами, различающимися

ся по  $m/z$  в несколько раз и, соответственно, разными масштабами их ларморовских траекторий (в сравнении с размерами каверны).

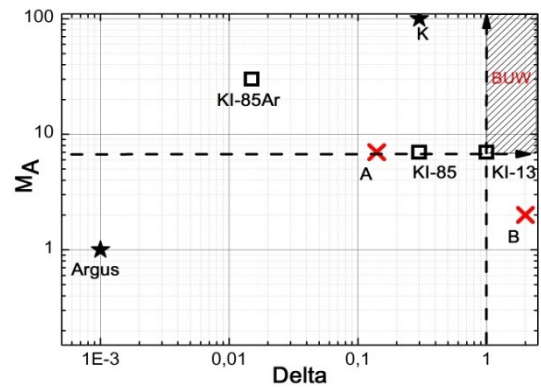


Рис. 5. Сводные данные по условиям лабораторных и активных экспериментов в широком диапазоне критериев ( $M_{A0}$  и  $\delta$ ) задачи генерации БУВ в замагниченной фоновой плазме: **A** и **B** – 2 варианта экспериментов (в табл.) на установке LAPD (США); **KI-13** – условия первых успешных опытов по БУВ на КИ-1 ИЛФ (2013–2016 гг.) при  $\delta \approx 1$ ; **KI-85**, **KI-85Ar** – то же по исследованию МЛМ (1985 г.) в  $H^+$  или  $Ar^+$  фоне; **Argus** и **K** – ориентировочные условия активных экспериментов; **BUW** – область возможной генерации БУВ

#### 4. Сравнение экспериментальных данных с результатами численного моделирования бесстолкновительного взаимодействия плазменного облака с замагниченной фоновой плазмой на основе гибридных моделей

В завершение обсуждения МЛМ-природы наблюдаемого сильного бесстолкновительного взаимодействия между существенно сверхальфвеновским потоком ( $M_{A0} \approx 7$ ) лазерной плазмы и замагниченной фоновой плазмой, в первую очередь отметим, что вплоть до настоящего времени не было найдено ни экспериментально, ни теоретически ни одного процесса такого типа взаимодействия при числах  $M_{A0} \geq 4\text{--}5$ , помимо самого МЛМ (и неустойчивости Вейбеля [4], которая, однако, реализуется в виде БУВ совсем на других масштабах  $\Delta \geq 100 C/\omega_{pi}$ ). Для подтверждения эффективности МЛМ в данном случае, применим, как и ранее [18–20] метод сравнения экспериментальных данных с соответствующими расчетными по гибридным моделям ВНИИЭФ [13], «Облако» ИТПМ СО АН [20], а в данном случае – недавней разработкой Вшивкова К. В. «SOME», как новой версии «Облака», специально для анализа результатов экспериментов на стенде КИ-1. Эта модель, как и

аналогичная модель ВНИИЭФ [13] для осесимметричного сферического облака, в своих уравнениях не содержит никаких других эффектов взаимодействия, кроме ламинарных радиальных и вихревых электрических полей, последнее из которых и обеспечивает МЛМ-взаимодействие. Приведенные на рис. 4 сравнительные данные ( $R-t$ ) диаграмм торможения максимумов  $n$  и  $B$  в эксперименте (точки 1,2) и в расчетах (точки 3 и 4, при тех же параметрах и ионном составе ЛП из  $H^+$ ,  $C^{+2}$  и  $C^{+3}$ , приведенных в таблице) показывают, что эти основные общие характеристики взаимодействия хорошо описываются МЛМ-моделью. А сравнение на рис. 6 экспериментальных и расчетных профилей полной концентрации  $N$ , плазмы и магнитного поля  $H_z$  (в направлении  $\theta = 90^\circ$ , поперек магнитного поля  $B_0$ ), демонстрирует возможности численного моделирования деталей МЛМ-взаимодействия и генерации БУВ. Конечно, МГД-описание электронов в гибридных моделях, только в очень ограниченной степени позволяет применять их в исследованиях БУВ, но в некоторых случаях [15, 20, 25] достаточно эффективно.

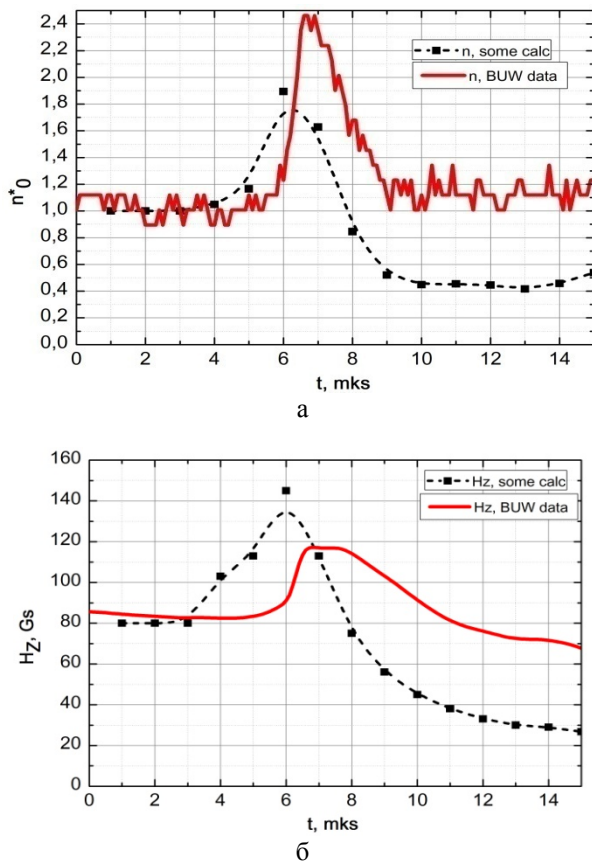


Рис. 6. Детальное сравнение динамики экспериментальных (сплошные линии) концентрации (а) и поля (б) с расчетными величинами (пунктирные линии) по гибридной модели SOME

## 6. Заключение

В работе представлены теоретическое обоснование и основные результаты первого успешного эксперимента «БУВ» [10–12] по генерации лазерной плазмой Бесстолкновительных Ударных Волн в замагниченной фоновой плазме. Классический подход основан на действии так называемого Магнитного Ламинарного Механизма [13], обеспечивающего бесстолкновительное взаимодействие взаимопроникающих сверхальфеновских плазменных потоков лазерной и фоновой плазмы в поперечном магнитном поле за счет вихревых электрических полей.

Работа была выполнена в рамках программы N II.10.1.4 (01201374303) Фундаментальных исследований ИЛФ СО РАН, Проекта 2.3 Программы «Экстремальное лазерное излучение: физика и фундаментальные приложения» Президиума РАН на 2015 г. и Проекта II.2П/II.10-19 Комплексной программы фундаментальных исследований Сибирского Отделения РАН № II.2П «Интеграция и развитие» на 2016 г. Работа была частично поддержана в рамках Программы Президиума РАН «Фундаментальные основы технологий двойного назначения в интересах национальной безопасности».

## Список литературы

1. Grun J., Buckingham A., Burriss R., Crawford J., Ripin B.H., Stamper J. Laser-generated high Mach-number shocks in lab simulations of astrophysical phenomena // Proc. 1<sup>st</sup> Intern. Workshop on Laboratory Astrophysics Experiments with Large Lasers, Pleasanton, 1996 Report CONF-960297 of Lawrence Livermore National Laboratory. P. 108–116.
2. Antonov V. M., Zakharov Yu. P., Orishich A.M., Ponomarenko A.G., et al., Laser plasma cloud simulation for investigations of a collisionless interaction processes between exploding plasmas and media in space // Ibid, , P. 296–303.
3. 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.
4. Proceed. 10<sup>th</sup> Intern. Conf, “High Energy Density Laboratory Astrophysics” (Bordeaux, France May 2014) in Journal High Energy Density Physics. 2015. Vol.17A. P. 1–218.

5. Woolsey N. C., Abou Ali Y., Evans R.G., et al. Collisionless shock and supernova remnant simulations on VULCAN // *Physics of Plasmas*. 2001. Vol. 8, N 5. P. 2439–2445.
6. 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.
7. Zakharov Yu. P. Collisionless laboratory astrophysics with lasers // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2003. Vol.31, P. 1243–1251.
8. Schaeffer D. B., Everson E.T., D. 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.
9. Schaeffer D. B., Everson E.T., Winske D. et al. Experimental study of subcritical laboratory magnetized collisionless shocks using a laser-driven magnetic piston // *Physics of Plasmas*. 2015. Vol. 22, N 11. 113101.
10. Zakharov Yu. P., Ponomarenko A. G., Terekhin 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)*.
11. Zakharov Yu. P., Ponomarenko A. G., Terekhin 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.
12. 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*, № 5 в печати (2016).
13. 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.
14. 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.
15. Winske D., Cowee M. Conditions for Debris-Background Ion Interactions and Collisionless Shock Wave Generation // *Report LA-UR-12-22823 Los Alamos National Laboratory*. 2012. P. 61.
16. Longmire C. L. Rand Corporation Report, Notes on Debris-Air-Magnetic Interaction, RM-3386-PR (Santa-Monica, 1963), 8 p.
17. Wright T. P. Early time model of laser plasma expansion // *Physics of Fluids*. 1971. Vol. Vol.14, N 9. P. 1905–1910.
18. Антонов В. М., Башурин В. П., Голубев А. И., Жмайло В. А., Захаров Ю. П. и др. Экспериментальное исследование бесстолкновительного взаимодействия сверхальфвеновских взаимопроницающих потоков плазмы // *ПМТФ*. 1985. № 6, С. 3–10.
19. Антонов В. М., Башурин В. П., Голубев А. И., Жмайло В. А., Захаров Ю. П., Оришич А. М., Пономаренко А. Г., и др., Лабораторное и численное моделирование нестационарных процессов в космической плазме // *Физика космической и лабораторной плазмы*. 1989. Новосибирск (Наука). С. 4–17.
20. 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.
21. Burgess D., Collisionless shocks, in *Introduction to Space Physics*, Ed. M. G. Kivelson and C. T. Russell, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K. 1995. P. 129–163.
22. Omidi N., Sibeck D. G. Formation of a hot flow anomalies and solitary shocks // *J. Geophys. Res.* 2007. Vol. 112. A01203.
23. Edmiston J.P., Kennel C. F. A parametric survey of the first critical Mach number for a fast MHD shock // *J. Plasma Physics*. 1984. Vol. 32, N 3. P. 429–441.
24. 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.
25. Lembege B., Simonet F. Hybrid particle simulations of an interface expansion and collisionless shock: A comparative and quantitative study // *Physics of Plasma*. 2001. Vol. 8, N. 9. P. 3967–3981.