

**ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ УДАРНЫХ ВОЛН,
ФОРМИРУЕМЫХ В РАЗРЕЖЕННОМ ГАЗЕ
ПРИ ЛАЗЕРНОМ НАГРЕВЕ ПЛАЗМЫ**

H. Г. Басов, M. Ю. Мазур, A. M. Максимчук,
Ю. А. Михайлов, Г. В. Слизков, С. И. Федотов

В статье приводятся результаты экспериментов по генерации сильной ударной волны в атмосфере окружающего мишень диагностического газа при лазерном нагреве плазмы. Наблюдается существенное отклонение поведения ударной волны от автомодельного решения для мгновенного точечного взрыва.

Лазерная плазма, расширяясь в атмосферу разреженного газа, образует сильную ударную волну (УВ). Исследования УВ в экспериментах со сферической геометрией развивались главным образом с целью создания методики определения поглощенной плазмой лазерной энергии¹. При этом для проведения энергетических оценок использовалась модель мгновенного точечного взрыва Седова². В этой модели закон движения УВ имеет вид $R \approx At^{0.4}$ и энергия является интегралом движения. Однако, существуют условия, при которых возможны отклонения от упомянутой зависимости. В ряде работ^{3, 4} было замечено, что закон движения УВ может отличаться от $t^{0.4}$, но малый энергетический уровень экспериментов не позволил установить это отличие с необходимой достоверностью. В данной статье приводятся результаты экспериментальных исследований асимптотической стадии разлета УВ в экспериментах по лазерному нагреву оболочечных мишеней с целью выяснения корректности использования модели Седова.

Эксперименты проводились на мощной лазерной установке "Дельфин-1"⁵. Лазерная энергия изменялась в пределах от 100 Дж до 1 кДж при длительности импульса 3 нс. Плотность потока на мишени варьировалась от $2 \cdot 10^{13}$ Вт/см² до 10^{14} Вт/см². В качестве мишеней использовались стеклянные микробаллоны диаметром $2R = 400 - 600$ мкм с аспектным отношением $R/\Delta R = 100 - 200$ (ΔR – толщина оболочки мишени). Исследовались дейтерий или гелий при давлении 10 – 20 торр.

Регистрация ударных волн осуществлялась с помощью системы многокадрового сверхскоростного шлирен фотографирования⁶, которая позволяла фиксировать положение фронта УВ с пространственным разрешением 0,3 мм и временным разрешением 2 нс. Аппаратура давала возможность получить 19 кадров с интервалом от 6,6 нс до 200 нс и максимальным временем наблюдения 500 нс. Поле зрения 6 см.

На рис. 1 приведены характерные $R - t$ -диаграммы асимптотической стадии разлета УВ в дейтерии (давление 10 торр). Кривая 1 соответствует лазерной энергии $E_{\text{л}} \approx 100$ Дж, кривая 2 – $E_{\text{л}} = 805$ Дж и кривая 3 – 958 Дж. Как можно видеть из рисунка для кривых 2 и 3, начиная с 60 нс, разлет УВ носит автомодельный характер и может быть представлен выражением

$$R = At^{\alpha}, \quad (1)$$

где A и α – некоторые константы по времени. Причем на протяжении всего времени наблюдения ($t_{19} = 400$ нс) отклонения от автомодельности не наблюдается. Для кривой 1 отсутствует линейный участок $R - t$ -диаграммы, что свидетельствует о том, что при таких малых лазерных энергиях УВ не выходит на режим автомодельного разлета. Обработка большого числа экспериментальных данных позволила определить минимальную лазерную энергию, начиная с которой на $R - t$ -диаграмме УВ можно выделить участок описываемый (1). Эта энергия составляет 100 Дж. Существенного различия в характере разлета УВ в зависимости от сорта газа, дейтерия или гелия, зарегистрировано не было.

Для кривых 2 и 3 на рис. 1 линейная часть имеет разный наклон. Это говорит о том, что показатель степени в выражении (1) для различных экспериментальных условий различен.

Для определения α из полученных $R - t$ -диаграмм был применен метод наименьших квадратов. В качестве искомой функции бралась зависимость вида $R = A(t + t_0)^\alpha$, где t_0 – некоторая временная задержка, вводимая для того, чтобы исключить начальную стадию разлета УВ, когда движение волны еще не вышло на асимптотику. Такой подход позволил также избежать увеличения погрешности из-за неточности времени синхронизации экспериментальной аппаратуры (6 нс). Величина временной задержки отличается для различных экспериментов и определяется в каждом конкретном случае. Константа A определяется переданной УВ энергией и состоянием газа и может быть различной, поэтому она также нуждается в вычислении для каждого опыта. Предложенный метод позволяет находить показатель степени α с 10 % точностью, которая определяется точностью определения радиуса ударной волны, количеством обрабатываемых точек на $R - t$ -диаграмме и числом шагов аппроксимации.

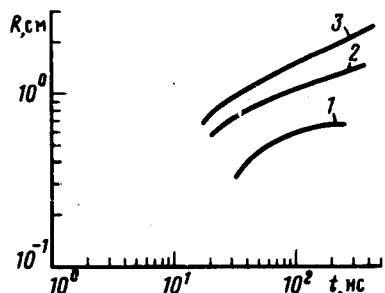


Рис. 1. Характерные $R - t$ -диаграммы асимптотической стадии разлета УВ в дейтерии (давление 10 торр): кривые 1 – $E_L \approx 100$ Дж, 2 – $E_L = 805$ Дж, 3 – $E_L = 958$ Дж

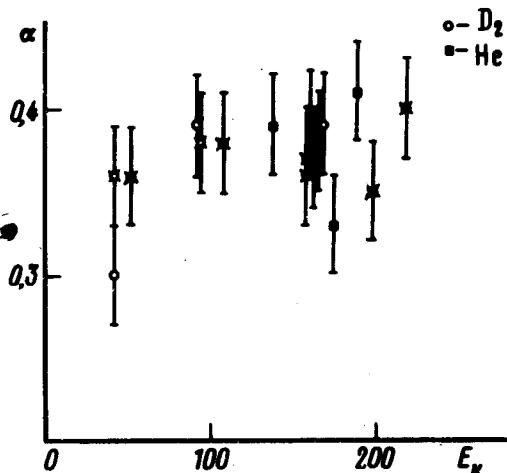


Рис. 2. Зависимость показателя степени α от поглощенной лазерной энергии

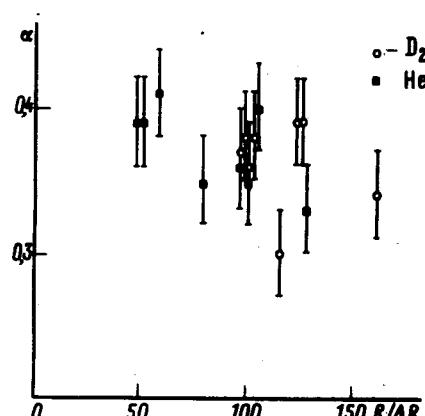


Рис. 3. Зависимость показателя степени α от аспектного отношения мишени

Обработка экспериментальных $R - t$ -диаграмм в рассматриваемой серии опытов позволила установить, что показатель степени α изменяется от эксперимента к эксперименту в пределах от 0,3 до 0,4. На рис. 2 приведен график α от поглощенной лазерной энергии, определенной с помощью балансных калориметрических измерений⁷. Как видно из рисунка α не зависит от энергии. Особенно это наглядно, если сравнивать точки, отмеченные крестиком, которые соответствуют экспериментам с мишенями, имеющими одинаковое аспектное отношение ($R/\Delta R \approx 120$). На рис. 3 приведена зависимость α от аспектного отношения мишени. С увеличением аспектного отношения наблюдается падение показателя. Возможной причиной может быть заметное влияние процессов передачи энергии от плазмы к газу на характер автомодельного движения УВ. Для более полного объяснения полученного результата необходимы дополнительные теоретические и экспериментальные исследования. Таким образом, при формировании сильных ударных волн лазерной плазмой в экспериментах со сферическими оболочечными мишенями может наблюдаться существенное отличие поведения УВ от автомодельного решения для мгновенного точечного взрыва, и корректность

использования модели Седова для определения энергии ударной волны должна проверяться в каждом конкретном эксперименте.

В заключение авторы выражают благодарность Б.А.Васину и С.А.Чаушанскому за помощь в проведении экспериментов и А.А.Филюкову за полезные обсуждения.

Литература

1. *Басов Н.Г., Крохин О.Н., Склизков Г.В.* Письма в ЖЭТФ, 1967, 6, 683.
2. *Седов Л.И.* Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1981.
3. *Басов Н.Г., Захаренков Ю.А., Зорев Н.Н. и др.* Нагрев и сжатие термоядерных мишеней, облучаемых лазером. Радиотехника. М.: ВИНТИ, 1982, 26.
4. *Абрамов И.А., Воленко В.В., Волошин Н.П. и др.* ЖЭТФ, 1982, 83, 3.
5. *Басов Н.Г., Михайлов Ю.А., Склизков Г.В., Федотов С.И.* Лазерные термоядерные установки. Радиотехника, 25. М.: ВИНТИ, 1984.
6. *Валуев А.Д., Васин Б.Л., Зубков В.М. и др.* Препринт ФИАН № 172, 1983.
7. *Васин Б.Л., Данилов А.Е., Калашников М.П. и др.* Квантовая электроника, 1984, 11, 1319.

Физический институт им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
31 августа 1987 г.