

# ГЕНЕРАЦИЯ ПЛОСКОЙ СТАЦИОНАРНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПРИ ПРЕДЕЛЬНО ВЫСОКОЙ ПЕРЕДАЧЕ ДАВЛЕНИЯ ТВЕРДОМУ ВЕЩЕСТВУ ОТ МАЛОПЛОТНОГО ПОГЛОТИТЕЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ТЕРАВАТТНОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА

*И. А. Белов<sup>a</sup>, С. А. Бельков<sup>a</sup>, С. В. Бондаренко<sup>a</sup>, Г. А. Вергунова<sup>b</sup>, А. Ю. Воронин<sup>a</sup>,  
С. Г. Гаранин<sup>a</sup>, С. Ю. Головкин<sup>a</sup>, С. Ю. Гуськов<sup>b</sup>, Н. Н. Демченко<sup>b</sup>, В. Н. Держач<sup>a</sup>,  
Н. В. Змитренко<sup>c</sup>, А. В. Илюшечкина<sup>a</sup>, А. Г. Кравченко<sup>a</sup>, А. А. Кузина<sup>a</sup>,  
И. В. Кузьмин<sup>a</sup>, П. А. Кучугов<sup>b,c</sup>, А. Е. Мюсова<sup>a</sup>, В. Г. Рогачев<sup>a</sup>, А. Н. Рукавишников<sup>a</sup>,  
Е. Ю. Соломатина<sup>a</sup>, К. В. Стародубцев<sup>a</sup>, П. В. Стародубцев<sup>a</sup>, И. А. Чугров<sup>a</sup>,  
О. О. Шаров<sup>a</sup>, Р. А. Яхин<sup>b\*</sup>*

<sup>a</sup> Российский федеральный ядерный центр –  
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики  
607188, Саров, Нижегородская обл., Россия

<sup>b</sup> Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук  
119991, Москва, Россия

<sup>c</sup> Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша Российской академии наук  
125047, Москва, Россия

Поступила в редакцию 18 октября 2023 г.,  
после переработки 17 ноября 2023 г.  
Принята к публикации 20 ноября 2023 г.

Экспериментально обоснована генерация в твердом веществе мощной лазерно-индуцированной ударной волны с длительным периодом стационарного распространения плоского фронта при предельно высокой передаче давления твердому веществу от малоплотного поглотителя излучения тераваттного лазерного импульса. Эксперименты выполнены с плоскими мишенями, содержащими слой алюминия различной формы и слой поглотителя лазерного излучения из пористого вещества с плотностью 0.01–0.025 г/см<sup>3</sup>. Мишени облучались импульсами излучения второй гармоники Nd-лазера с интенсивностью  $10^{13}$ – $5 \cdot 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>. Зарегистрировано стационарное распространение плоских ударных волн в алюминиевом слое со скоростью 20–30 км/с в течение времени более 1 нс при близком к предельному увеличению давления от 3–3.5 Мбар в слое поглотителя до 7–10 Мбар в слое алюминия. Результат в значительной степени развивает возможности прецизионного управления пространственно-временной динамикой ударных волн в исследованиях уравнения состояния вещества.

DOI: 10.31857/S0044451024040126

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Один из эффективных способов генерации мощной лазерно-индуцированной ударной волны (УВ)

в твердом веществе состоит в использовании мишени, содержащей малоплотный поглотитель излучения лазерного импульса в виде слоя пористого вещества. В основе такого подхода лежит универсальный метод увеличения давления УВ при ее переходе из менее плотной среды в более плотную [1]. В свою очередь, само пористое вещество, не требующее в отличие от газообразной среды специальных технических усилий для его использования в каче-

\* E-mail: yakhin.rafael@gmail.com

стве элемента мишени, обладает набором важных достоинств, относящихся к поглощению лазерного излучения и образованию абляционного давления. К ним относится установленная во многих экспериментах [2–7] высокая доля поглощенной энергии первой – третьей гармоник Nd-лазера: 80–90% в пористых средах легких элементов с плотностью как меньшей, так и большей критической плотности образующейся плазмы. Кроме того, поглощение излучения в веществе со сверхкритической плотностью является предпосылкой образования давления более высокого, чем при воздействии лазерного импульса на твердое вещество, когда излучение имеет возможность поглощаться только в плазме докритической плотности [8, 9].

Эксперименты показали высокую эффективность использования пористого вещества в качестве малоплотного поглотителя, в котором происходят поглощение излучения тераваттного лазерного импульса и первоначальная генерация УВ. В работах [10–13] было зарегистрировано 2.5–3-кратное увеличение давления в алюминиевом слое по сравнению с давлением в пористом поглотителе. Мишени в виде слоя алюминия, покрытого слоем пористого ТМРТА-вещества ( $C_{15}H_{20}O_6$ ) в широком диапазоне плотностей последнего (2–10 мг/см<sup>3</sup>), облучались лазерными импульсами субнаносекундной длительности (400–600 пс) излучения второй гармоники Nd-лазера и третьей гармоники I-лазера с интенсивностью около  $10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>. В экспериментах [14, 15] при облучении лазерным импульсом со значительно большей длительностью (3–4 нс) мишеней с более протяженными слоями пористого поглотителя из ТАЦ-вещества ( $C_{12}H_{16}O_8$ ) с плотностями в диапазоне 5–25 мг/см<sup>3</sup> было достигнуто еще более высокое, рекордное на сегодняшний день превышение давления в 3–3.5 раза, близкое к предельному (около 4 раз [12, 16]). Эксперименты были выполнены на установке «Луч» в Институте лазерно-физических исследований Российского федерального ядерного центра ВНИИЭФ (ИЛФИ РФЯЦ-ВНИИЭФ) при облучении мишеней с ТАЦ-материалом пучком излучения второй гармоники Nd-лазера с энергией 200–600 Дж [17]. Применялась известная методика определения скорости УВ в слое алюминия. Мишень представляла собой плоский слой поглотителя, комбинированный со слоем алюминия толщиной около 20 мкм (эта конструкция называется базовой), на тыльной стороне алюминиевого слоя напылялась дополнительно ступень того же материала толщиной 10–20 мкм. В эксперименте измерялась разность моментов

времени выхода УВ на тыльную сторону базового слоя и на тыльную сторону ступени. Скорость УВ определялась как отношение толщины ступени к этой разности моментов времени.

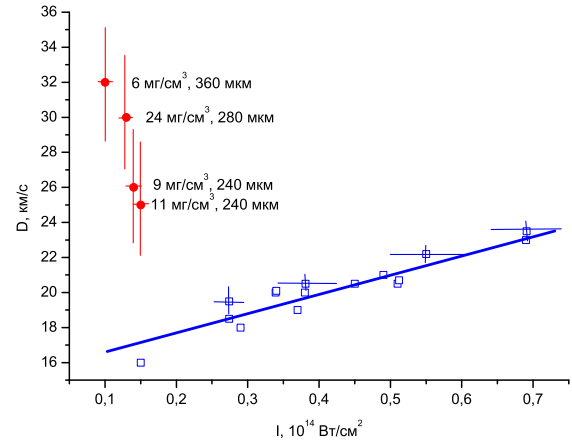


Рис. 1. (В цвете онлайн.) Средние скорости УВ в алюминии, измеренные в опытах с мишенями, содержащими поглотитель в виде слоя пористого ТАЦ-вещества с толщинами от 240 до 360 мкм (красные точки) и в виде слоя лавсана толщиной 4 мкм (синие квадраты)

На рис. 1 показаны сводные данные по измерению скорости УВ в одноступенчатом слое алюминия в мишенях, содержащих слой пористого ТАЦ-поглотителя с плотностями 5–25 мг/см<sup>3</sup> и толщинами от 200 до 400 мкм (часть этих данных приведена в работах [14, 15]), и в мишенях, содержащих поглотитель из твердого лавсана с плотностью около 1.3 г/см<sup>3</sup> и толщиной 4 мкм.

Данная работа посвящена исследованию пространственно-временной динамики лазерно-индуцированных УВ в мишенях, обеспечивающих предельно высокую передачу давления твердому веществу от малоплотного поглотителя излучения тераваттного лазерного импульса. Контроль длительности стационарного распространения УВ и формы ее фронта имеет принципиальное значение для практических приложений, связанных с исследованием уравнения состояния (УРС) вещества и лазерного термоядерного синтеза. Так, требования ударно-волнового эксперимента по исследованию УРС состоят в том, что УВ должна оставаться плоской и квазистационарной в течение всего периода проведения измерений. Кроме того, волна должна распространяться по мишени на расстояние, превышающее по крайней мере пространственное разрешение используемых методов диагностики, за время, превышающее по крайней мере их временное разрешение.

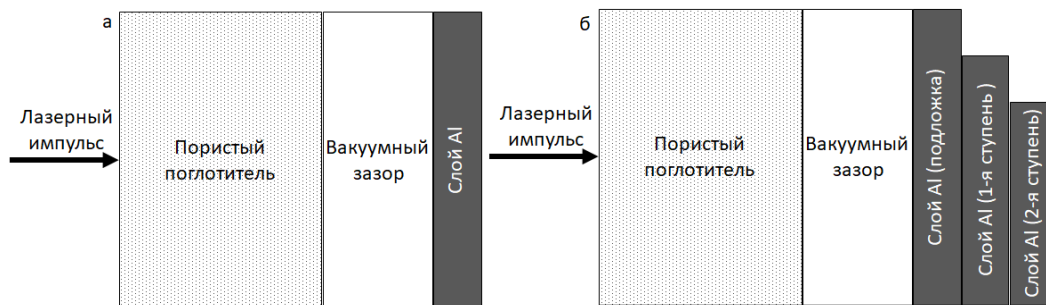


Рис. 2. Схема мишени для измерения одновременности выхода УВ на тыльную поверхность слоя алюминия (а) и схема мишени для исследования временной динамики УВ (б)

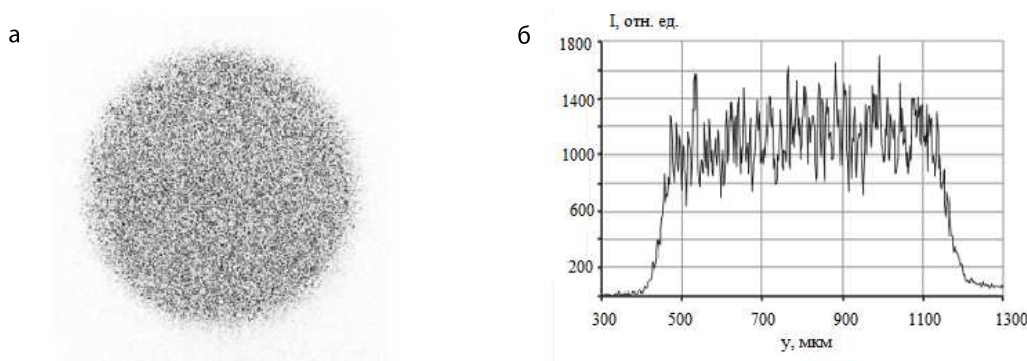


Рис. 3. Пятно фокусировки (а) и его пространственное распределение (б) на поверхности мишени

## 2. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты выполнены на установке «Луч» ИЛФИ РЯЦ-ВНИИЭФ в условиях облучения, которые применялись в работах [14, 15]. Так же, как и в этих работах, использовались мишени, которые содержали слой пористого ТАЦ-поглотителя лазерного излучения и твердотельную часть мишени из алюминия (рис. 2). Эти части мишени были разделены вакуумным промежутком, наличие которого являлось результатом использования выбранной технологии сборки мишени. Пористый ТАЦ-поглотитель представлял собой мелкопористую среду со смешанной мембранно-нитевидной структурой твердых элементов в составе открытых пор размером около 0.5 мкм. Средняя плотность и толщина поглотителя варьировались соответственно в пределах 0.01–0.025 г/см<sup>3</sup> и 200–400 мкм. Толщины слоя поглотителя значительно превышали длину геометрической прозрачности ТАЦ-вещества с указанной плотностью. Использовались два типа мишеней, которые различались устройством твердотельной части: плоский слой применялся для исследова-

ния пространственной однородности (разновременности) УВ в поперечном сечении (рис. 2а), плоский слой, дополненный двумя ступенями, — для измерения средней скорости УВ на разной глубине алюминиевого материала (рис. 2б). Регистрировались моменты выхода УВ из базового слоя и ступеней алюминия.

Толщина плоского слоя из алюминия во всех мишенях составляла примерно 20 мкм, максимальная толщина с учетом толщин ступеней — около 50 мкм. В текущей серии экспериментов выход УВ из мишени определялся по свечению плазмы при разгрузке в вакуум. Регистрация проводилась с помощью щелевого фотохронографа [18] на основе время-анализирующего электронно-оптического преобразователя с размером рабочего поля фотокатода 8 мм, усилителем яркости с микроканальной пластиной и цифровой ПЗС-камерой с матрицей 1000 × 1000 элементов. Методика регистрации подробно описана в работе [14], временное разрешение составляло около 30 пс, пространственное — около 20 мкм.

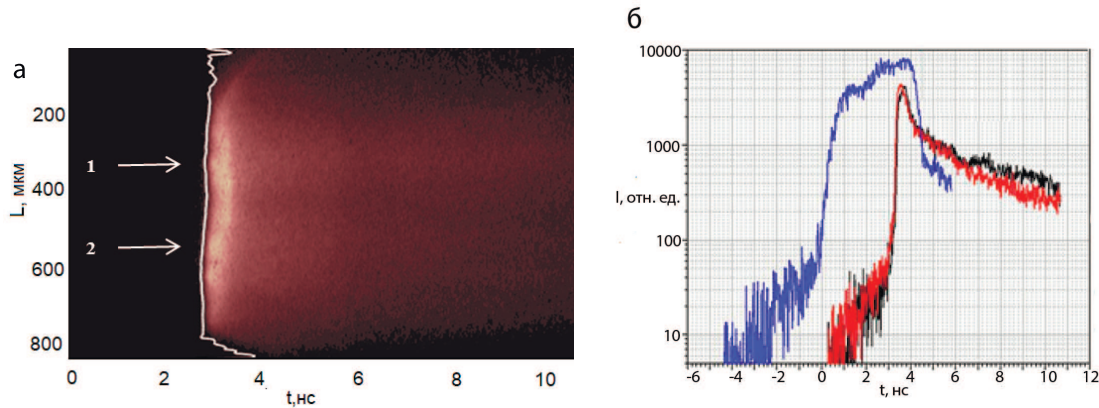


Рис. 4. (В цвете онлайн) а) Хронограмма свечения УВ в эксперименте №3 из табл. 1: кривая белого цвета — изолиния выхода фронта УВ. б) Временные зависимости свечения для разных поперечных координат мишени плоского типа: кривая черного цвета — сечение 1, кривая красного цвета — сечение 2, кривая синего цвета — сечение 3 (метка лазерного импульса)

Методика определения пространственно-временной структуры фронта УВ на выходе базового слоя заключалась в следующем. Проводились коррекция сигнала с вычетом фона и свертка сигнала свечения с аппаратной функцией. Массив координат формировал изолинию сигнала, определяемую как фронт УВ.

Мишени по нормали облучались импульсами излучения второй гармоники Nd-лазера с энергией в диапазоне 200–400 Дж, с длительностью около 4 нс, что так же, как ранее [14, 15], обеспечивало генерацию УВ в условиях практически предельного увеличения давления при переходе УВ из малоплотного поглотителя в твердое вещество. Временная форма импульса представляла собой трапецию с длительностью на полувысоте интенсивности от 3.4 до 3.8 нс и длительностями нарастающей и спадающей частей соответственно около 1.5–2.2 нс и около 1 нс. Для обеспечения равномерного распределения интенсивности излучения в пятне фокусировки пучка на поверхности мишени применялась фазовая пластина, которая формировала пятно диаметром 700 мкм с диаметром однородной части около 600 мкм (рис. 3). Интенсивность излучения на поверхности мишени в различных опытах составляла от  $10^{13}$  до  $2 \cdot 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>. Максимальная неоднородность облучения в центральной части пятна с учетом пространственных масштабов более 50 мкм составляла не более 14%, среднеквадратическая — около 3–4%.

Численное моделирование проводилось по одномерной программе лагранжовой гидродинамики СНД [19, 20] и двумерной программе эйлеровой гидродинамики NUTCY [21] расчета взаимодействия

тераваттного лазерного импульса с плазмой. Для данных исследований программы были дополнены блоками расчета взаимодействия лазерного излучения с частично-гомогенизированной плазмой пористого вещества. Поглощение излучения рассчитывалось как результат обратного тормозного процесса в объеме плазмы на глубине геометрической прозрачности [22], зависящей от длительности гомогенизации плазмы в ион-ионных столкновениях в данной точке плазмы в данный момент времени [23, 24]. В уравнении движения и уравнении энергии использовались операторы ограничения соответственно градиента давления и потока электронной теплопроводности, которые также являются функциями длительности гомогенизации [8, 24]. Для мелкопористого поглотителя, используемого в обсуждаемых экспериментах, результаты расчетов незначительно отличались от случая эквивалентного (по плотности и химическому составу) сплошного вещества. Скорость распространения УВ в пористом поглотителе, характерное время гомогенизации поры в котором составляло около 20 пс, снижалась по сравнению со сплошным веществом не более чем на 10%.

### 3. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ В МАЛОПЛОТНОМ ПОРИСТОМ ВЕЩЕСТВЕ

В табл. 1 представлены условия проведения и результаты экспериментов, а также результаты численных расчетов, относящиеся к исследованию пространственной структуры УВ в поперечном направлении. Измеренные значения разновременности  $\Delta t$

**Таблица 1.** Условия проведения и результаты экспериментов, а также результаты численных расчетов по исследованию пространственного распределения скорости УВ:  $h_p$  и  $\rho$  — толщина и средняя плотность пористого поглотителя;  $h_g$  — толщина вакуумного промежутка между слоем пористого поглотителя и слоем алюминия;  $h_0$  — толщина слоя алюминия;  $E_{2\omega}$  — энергия лазерного импульса второй гармоники в пятне облучения;  $I$  — интенсивность лазерного излучения в центральной однородной части пятна;  $\Delta\tau$  — разновременность выхода УВ в центре и на краю пятна;  $\delta V_{ex}/V_c$  — разность скоростей УВ в центре и на краю пятна, рассчитанная по разновременности  $\Delta\tau$  и отнесенная к скорости УВ в центре пятна двумерного численного расчета;  $V_c$  — скорость УВ в центре пятна фокусировки в двумерном численном расчете;  $\delta V_s/V_c$  — разность скоростей УВ в центре и на краю пятна, отнесенная к скорости УВ в центре пятна фокусировки в двумерном численном расчете  $V_c$ .

№	$h_p$ ,	$\rho$ ,	$h_g$ ,	$h_0$ ,	$E_{2\omega}$ ,	$I$ ,	$\Delta\tau$ ,	$\delta V_{ex}/V_c$	$V_c$ ,	$\delta V_s/V_c$
	мкм	мг/см <sup>3</sup>	мкм	мкм	Дж	10 <sup>13</sup> Вт/см <sup>2</sup>	пс		км/с	
1	304	10	47	20	260	1.5	40	0.055	28	0.07
2	361	9	43	20	210	1.2	20	0.024	24	0.06
3	222	9	64	20	200	1.2	50	0.052	21	0.08

выхода УВ на поверхность слоя алюминия с толщиной 20 мкм в середине и на краю пятна фокусировки лазерного пучка составляют от 20 до 50 пс.

На рис. 4 в качестве примера представлена регистрация фронта УВ и результаты ее обработки в эксперименте №3 из табл. 1. На рис. 4б представлены пространственные распределения сигналов свечения для разных фрагментов УВ. На рисунке также показана форма импульса облучения мишени (сечение 3), его временная привязка к хронограмме УВ осуществлена с использованием данных калибровочного эксперимента (без мишени).

Измеренные значения разновременности  $\Delta\tau$  использованы для расчета относительного уменьшения скорости УВ в поперечном сечении пятна. Для этого были использованы данные двумерных численных расчетов, выполненных по программе NUTCY. В табл. 1 приведены значения отношения разности скоростей УВ в центре и на краю пятна на тыльной поверхности слоя алюминия к средней скорости УВ  $V_c$  в алюминии вдоль оси лазерного пучка, полученной в расчете по программе NUTCY:  $\delta V_{ex}/V_c = V_c \Delta\tau / h_0$ . Определенное таким образом относительное уменьшение скорости УВ на краю пятна не превышает 6%, что свидетельствует о плоском фронте УВ в пределах пятна фокусировки лазерного пучка установки «Луч». Приведенные в табл. 1 значения  $\delta V_c/V_c$  численного расчета близки к значениям  $\delta V_{ex}/V_c$ , определенным по измеренным значениям разновременности  $\Delta\tau$ .

Наибольшая скорость УВ в слое алюминия  $V_c = 28$  км/с имеет место в расчете эксперимента №1 при максимальной интенсивности лазерного импульса  $1.5 \cdot 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>. Скорость  $V_c$  незначительно

снижается до 24 км/с в расчете эксперимента №2 при уменьшении интенсивности до  $1.2 \cdot 10^{13}$  Вт/см<sup>2</sup>. Мишень эксперимента №2 имела, как и мишень эксперимента №1, достаточно толстый слой поглотителя и близкое отношение толщины поглотителя к толщине вакуумного промежутка,  $h_p/h_g = 8.4$ . В расчете эксперимента №3 скорость  $V_c$  снижалась до значения 21 км/с при прочих равных условиях по сравнению с расчетом №2 за исключением соотношения  $h_p/h_g$ , которое в эксперименте №3 составляло значительно меньшую величину — 3.4. Наличие более тонкого слоя пористого поглотителя (при увеличенном зазоре) обуславливает уменьшение в эксперименте №3 скорости УВ в алюминии вследствие раннего прихода волны разгрузки со стороны слоя малоплотного вещества. Результаты эксперимента №2 показывают, что в нем получена наилучшая степень однородности распределения скорости  $\delta V_{ex}/V_c = 0.024$ , в то время как численный расчет не выделяет в значительной степени эксперимент №2 по сравнению с экспериментами №1 и №3 по величине  $\delta V_c/V_c$ . Эксперимент №2 отличался от экспериментов №1 и №3 тем, что в нем было наибольшее отношение  $h_p/h_g$ .

На рис. 5 в качестве примера результатов численных расчетов по программе NUTCY показаны для условий эксперимента №1 распределения плотности и давления в момент времени 3 нс, когда фронт УВ в центре пучка выходит на тыльную поверхность слоя алюминия. Лазерный пучок падает по нормали (на рис. 5 сверху вниз) на поверхность слоя поглотителя с плотностью 10 мг/см<sup>3</sup>, который в начальный момент занимал область с координатой  $z$  от 167 до 471 мкм и после которого располагались вакуумный



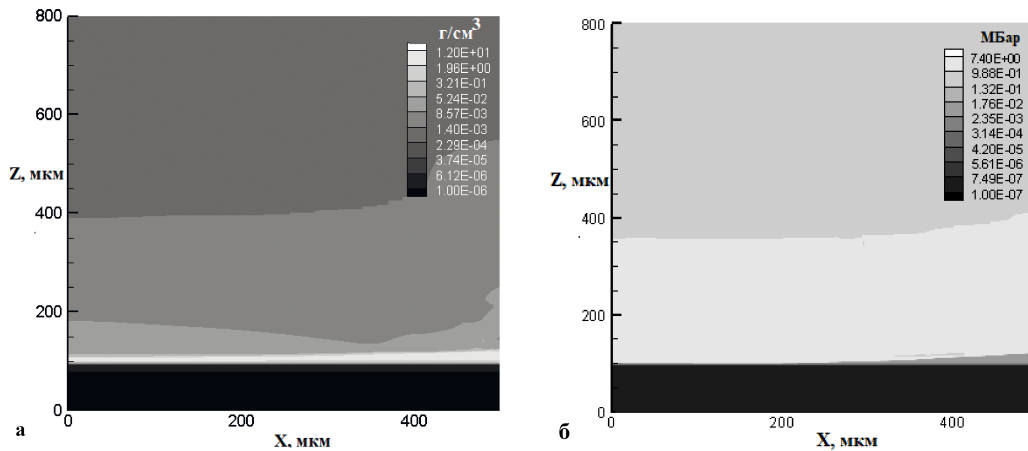


Рис. 5. Распределения плотности (а) и давления (б) в момент времени 3 нс (расчет по программе NUTCY)

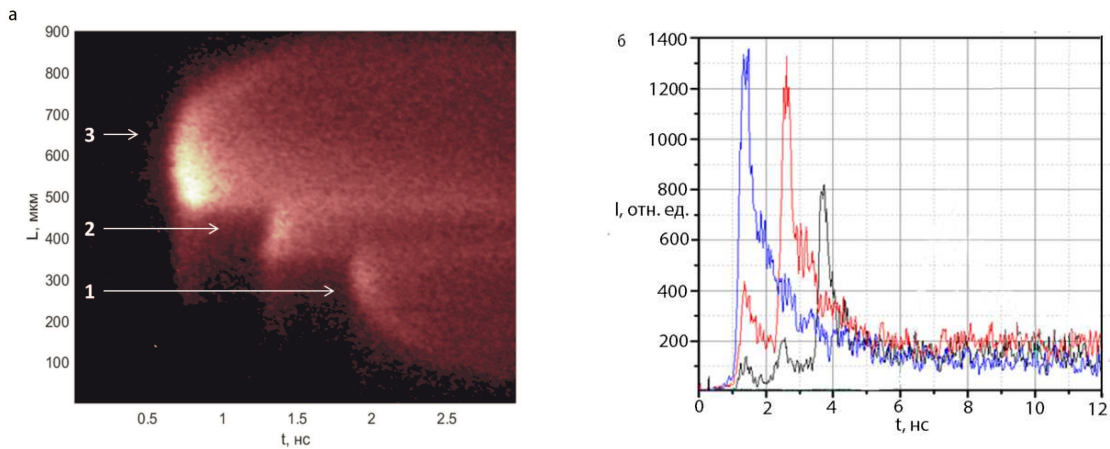


Рис. 6. (В цвете онлайн) Хронограмма свечения УВ в эксперименте №6 из табл. 2 (а) и временные зависимости свечения для разных поперечных координат мишени плоского типа (б). Кривая черного цвета — сечение 1, кривая красного цвета — сечение 2, кривая синего цвета — сечение 3

зазор с плотностью  $10^{-6} \text{ г/см}^3$  — при  $z$  от 120 до 167 мкм, а затем слой алюминия — при  $z$  от 100 до 120 мкм. К моменту времени 3 нс в центре пучка средняя скорость УВ составляет 28 км/с, давление за ее фронтом — около 7.5 Мбар, что примерно в 3 раза превышает давление за фронтом УВ в период ее распространения в слое пористого вещества. Разница в положении фронта волны в центре и на краю лазерного пучка составляет около 2 мкм, что соответствует запаздыванию около 70 пс.

Для оценки значения абляционного давления в малоплотном поглотителе может быть использован известный скейлинг [25, 26] для случая воздействия лазерного импульса на вещество со сверхкритической плотностью  $\rho > \rho_{cr}$ . Это связано с тем, что плотности поглотителей  $10 \text{ мг/см}^3$  и  $9 \text{ мг/см}^3$  мень-

ше критической плотности всего лишь соответственно в 1.2 и 1.4 раза и после генерации УВ лазерное излучение будет воздействовать на вещество со сверхкритической плотностью. Скейлинг для абляционного давления имеет вид

$$P_{ab}[\text{Мбар}] \approx \rho_{cr} \left[ \frac{2(\gamma - 1)}{3\gamma - 1} \frac{I}{\rho_{cr}} \right]^{2/3} \approx \approx 12 \left[ \frac{2(\gamma - 1)}{3\gamma - 1} \right]^{2/3} \left( \frac{A}{Z} \right)^{1/3} \frac{I_{(14)}^{2/3}}{\lambda_{\mu}^{2/3}}, \quad (1)$$

где  $\rho_{cr} \approx 1.8 \cdot 10^{-3} A/Z \lambda_{\mu}^2$  — критическая плотность в  $\text{г/см}^3$ ,  $A$  и  $Z$  — атомное число и степень ионизации плазмы,  $\lambda_{\mu}$  — длина волны в мкм,  $I_{(14)}$  — интенсивность в единицах  $10^{14} \text{ Вт/см}^2$ ,  $\gamma$  — показатель адиабаты.

**Таблица 2.** Условия проведения и результаты экспериментов, а также результаты численных расчетов по исследованию временной динамики скорости УВ:  $h_p$  и  $\rho$  — толщина и средняя плотность пористого поглотителя;  $h_g$  — толщина вакуумного промежутка между слоем пористого поглотителя и слоем алюминия;  $h_0$ ,  $h_1$  и  $h_2$  — толщина базового слоя и ступеней слоя алюминия;  $E_{2\omega}$  — энергия лазерного импульса второй гармоники в пятне облучения;  $I$  — интенсивность лазерного излучения в центральной однородной части пятна;  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  — разновременность между выходом УВ соответственно из базового слоя и первой ступени и из первой и второй ступеней;  $V_{1(ex)}$  и  $V_{2(ex)}$  — средние скорости УВ соответственно в первой и второй ступенях, измеренные в эксперименте;  $V_{1(c)}$  и  $V_{2(c)}$  — средние скорости УВ в первой и второй ступенях в расчете по программе СНД

№	$h_p$ ,	$\rho$ ,	$h_g$ ,	$h_0; h_1; h_2$ ,	$E_{2\omega}$ ,	$I$ ,	$\Delta t_1; \Delta t_2$ ,	$V_{1(ex)}; V_{2(ex)}$ ,	$V_{1(c)}; V_{2(c)}$
	мкм	мг/см <sup>3</sup>	мкм	мкм	Дж	10 <sup>13</sup> Вт/см <sup>2</sup>	пс	км/с	км/с
1	348	10	53	20; 13; 12	210	1.3	580; 540	23.3; 22.6	23; 20
2	339	10	41	20; 14; 16	180	1.1	630; 740	23.2; 21.5	22; 19
3	323	20	23	20; 12; 10	190	1.1	510; 550	22.9; 21.3	23; 21
4	280	24	22	20; 16; 16	310	1.3	720; 710	21.9; 22.8	23; 21
5	283	24	22	20; 11; 11	320	1.6	390; 470	29.7; 25.1	25; 23
6	300	25	38	20; 16; 13	420	1.8	580; 590	27.4; 22.2	23; 21

В приближении полностью ионизованной плазмы поглотителя ( $A/Z \approx 2$ ,  $\gamma = 5/3$ ) при  $\lambda_\mu = 0.53$  мкм для  $I = 0.15 \cdot 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup> оценка по формуле (1) дает значение  $P_{ab} = 3.2$  Мбар, которая находится в хорошем согласии с результатами численных расчетов. Приближенная оценка увеличения давления при переходе УВ из поглотителя с плотностью  $\rho_a$  в слой твердого вещества с плотностью  $\rho_s$  дается выражением [12, 16]

$$G \approx \left[ \frac{(1 + \beta^{1/2})}{\left(1 + \beta^{1/2} \frac{\rho_a}{\rho_s}\right)} \right]^2, \quad (2)$$

в котором  $\beta = (1 + \gamma_a)/(1 + \gamma_s)$ ,  $\gamma_a$  и  $\gamma_s$  — показатели адиабаты в поглотителе и твердой части мишени. При плотности поглотителя, много меньшей плотности твердой части мишени,  $\rho_a \ll \rho_s$ , выражение (2) дает масштаб предельного увеличения давления около 4. Давление УВ в алюминии 7.5 Мбар, полученное в численных расчетах, выполненнх с учетом реального УРС алюминия, соответствует увеличению давления по сравнению с давлением в поглотителе (3.5 Мбар) примерно в 3 раза, что близко к предельному.

В табл. 2 представлены условия проведения и результаты экспериментов, а также численные расчеты, относящиеся к исследованию временной динамики УВ, выполненного с использованием мишеней, содержащих двухступенчатый слой алюминия.

На рис. 6 в качестве примера представлена хронограмма эксперимента №6 из табл. 2, которая по-

казывает распространение УВ по ступенькам.

Результаты экспериментов свидетельствуют о высокой степени стационарности распространения УВ на дистанции около 30 мкм в течение времени до 1.5 нс. Снижение скорости УВ во второй ступеньке алюминия составляло не более 10–15% от скорости УВ в первой ступеньке. Столь высокая степень стационарности УВ и столь незначительное искажение пространственной формы ее фронта с большим запасом удовлетворяют возможностям пространственного и временного разрешения методов диагностики, применяемых в современных экспериментах по исследованию УРС. Численные расчеты были выполнены по одномерной программе СНД, использование которой обосновано результатами, свидетельствующими о плоском фронте УВ. Результаты расчетов показывают хорошее согласие с результатами экспериментов.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально обоснована высокая эффективность использования малоплотного поглотителя излучения тераваттного лазерного импульса наносекундной длительности для генерации плоской стационарной УВ при предельно высокой передаче давления твердому веществу от поглотителя. Для условий актуальных для исследования УРС установлены длительность стационарного распространения УВ в твердом веществе и степень сохранения плоского фронта такой волны.

При облучении мишеней, содержащих слой пористого поглотителя с плотностью 0.01–0.025 г/см<sup>3</sup> и толщиной от 200 до 400 мкм, импульсом излучения второй гармоники Nd-лазера с интенсивностью около 10<sup>13</sup> Вт/см<sup>2</sup> зарегистрировано стационарное распространение плоских УВ в алюминиевом слое со скоростью 20–30 км/с, изменение которой в поперечном направлении составило не более 5%, в течение периода времени, превышающего 1 нс, при близком к предельному увеличению давления от 3–3.5 Мбар в слое поглотителя до 7–10 Мбар в слое алюминия. Столь высокая степень стационарности УВ и незначительное искажение пространственной формы ее фронта с большим запасом удовлетворяют требованиям современного эксперимента по исследованию УРС.

Имея в виду известную зависимость давления, инициирующего УВ, от интенсивности и длины волны воздействующего лазерного излучения  $P \propto (I/\lambda)^{2/3}$  [25, 26], при увеличении интенсивности импульса на порядок можно прогнозировать увеличение давления стационарной плоской УВ в 4.5 раза — до 40 Мбар для второй гармоники излучения Nd-лазера и в 6 раз — до 50 Мбар для третьей гармоники.

**Финансирование.** Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект «Физика высоких плотностей энергии. Этап 2023-2025»).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*, Физматлит, Москва (2008).
2. А. Е. Bugrov, I. N. Burdonskii, V. V. Gavrilov et al., *Laser and Part. Beams* **17**, 415 (1999).
3. А. Caruso, C. Strangio, S. Yu. Gus'kov, V. B. Rozanov, *Laser and Part. Beams* **18**, 25 (2000).
4. T. Hall, D. Batani, W. Nazarov et al., *Laser and Part. Beams* **20**, 303 (2002).
5. Ph. Nicolaï, M. Olazabal-Loumé, S. Fujioka et al., *Phys. Plasmas* **19**, 113105 (2012).
6. S. Depierreux, C. Labaune, D. T. Michel et al., *Phys. Rev. Lett.* **102**, 195005 (2009).
7. M. Tanabe, H. Nishimura, S. Fujioka et al., *Appl. Phys. Lett.* **93**, 051505 (2008).
8. S. Yu. Gus'kov, M. Cipriani, R. De Angelis et al., *Plasma Phys. Controll. Fusion* **57**, 125004 (2015).
9. R. De Angelis, F. Consoli, S. Yu. Gus'kov et al., *Phys. Plasmas* **22**, 072701 (2015).
10. A. Benuzzi, M. Koenig, J. Krishnan et al., *Phys. Plasmas* **5**, 2827 (1998).
11. M. Temporal, S. Atzeni, D. Batani, and M. Koenig, *Euro. Phys. J. D* **12**, 509 (2000).
12. D. Batani, A. Balducci, W. Nazarov et al., *Phys. Rev. E* **63**, 046410 (2001).
13. J. Limpouch, N. N. Demchenko, S. Yu. Gus'kov et al., *Plasma Phys. Controll. Fusion* **46**, 1831 (2004).
14. И. А. Белов, С. А. Бельков, С. В. Бондаренко и др., *ЖЭТФ* **161**, 403 (2022).
15. С. А. Бельков, С. Г. Гаранин, В. Г. Рогачев, С. Ю. Гуськов, *Мощные лазеры, исследования в области физики высоких плотностей энергии*, Сборник тезисов докладов XLVIII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (2021).
16. S. Yu. Gus'kov, H. Azechi, N. N. Demchenko et al., *Plasma Phys. Controll. Fusion* **51**, 095001 (2009).
17. С. Г. Гаранин, А. И. Зарецкий, Р. И. Ильяев и др., *КЭ* **35**, 299 (2005).
18. Д. С. Корниенко, А. Г. Кравченко, Д. Н. Литвин и др., *ПТЭ* **2**, 78 (2014).
19. С. А. Бельков, Г. В. Долголева, *Вопросы атомной науки и техники, сер. Мат. моделирование физ. процессов* **1**, 59 (1992).
20. С. А. Бельков, С. В. Бондаренко, Е. И. Митрофанов, *КЭ* **30**, 963 (2000).
21. В. Ф. Тишкин, В. В. Никишин, И. В. Попов, А. П. Фаворский, *Матем. моделирование* **7**, 15 (1995).
22. С. Ю. Гуськов, В. Б. Розанов, *КЭ* **24**, 715 (1997).
23. S. Yu. Gus'kov, *J. Russian Laser Res.* **31**, 574 (2010).
24. M. Cipriani, S. Yu. Gus'kov, R. De Angelis et al., *Laser and Part. Beams* **36**, 121 (2018).
25. Yu. V. Afanasiev and S. Yu. Gus'kov, in: *Nuclear Fusion by Inertial Confinement. A Comprehensive Treatise*, ed. by G. Velarde et al., CRC Press (1992), p. 99.
26. J. Lindl, *Phys. Plasmas* **2**, 3933 (1995).