

ИССЛЕДОВАНИЕ УДАРА ДЮРАЛЮМИНИЕВОГО ФЛАЕРА ПО ВОЛЬФРАМОВОЙ МИШЕНИ НА УСТАНОВКЕ АНГАРА-5-1

© 2019 г. В. В. Александров^a, А. В. Браницкий^a, Е. В. Грабовский^a, Я. Н. Лаухин^a,
Г. М. Олейник^{a, *}, С. И. Ткаченко^{a, b, c}, И. Н. Фролов^a, К. В. Хищенко^{b, c}

^a ГНЦ “Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований”, Москва, Россия

^b Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Россия

^c Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

*e-mail: oleinik@triniti.ru

Поступила в редакцию 21.08.2018 г.

После доработки 25.10.2018 г.

Принята к публикации 25.10.2018 г.

Разгон флаера магнитным полем позволяет исследовать динамические характеристики вещества при субмикросекундных процессах. На установке Ангара-5-1 мегабарные давления создаются с помощью магнитного поля тока с линейной плотностью тока до 5 МА/см. В предыдущих экспериментах при разгоне флаера из дюралюминия была получена скорость до 10 км/с. Регистрация смещения флаера осуществлялась методом теневого лазерного зондирования. В настоящей работе исследовалась эффективность передачи импульса летящим флаером из дюралюминия изначально неподвижной мишени из вольфрама. По кинематическим параметрам движения флаера до удара и флаера совместно с мишенью после удара была оценена та часть массы флаера, которая передает импульс мишени. Установлено, что почти вся исходная масса флаера участвует в ударном воздействии на мишень.

DOI: 10.1134/S0367292119040012

ВВЕДЕНИЕ

Создание высокого давления с помощью магнитного поля тока, протекающего по образцу, позволило в последние годы надежно получать мегабарные давления и разгонять образцы-флаеры до скоростей в десятки километров в секунду. Нагружение образца магнитным полем позволяет исследовать динамические характеристики вещества при субмикросекундных процессах [1].

На установке Z при токе 20–25 МА получены скорости алюминиевого флаера до 34 км/с [2]. На установке Julong-I (PTS), получена скорость 21 км/с при токе 6–7 МА [3].

На установке Ангара-5-1 проводились эксперименты по разгону флаеров из меди [4], титана [5] и дюралюминия [6]. Последний был разогнан до скорости 10 км/с. В этих экспериментах ток с временем нарастания 150 нс в выходной части установки достигал 5 МА, а плотность тока на флаере – 5 МА/см.

Регистрация смещения флаера под действием магнитного поля тока осуществлялась методом теневого лазерного зондирования. Тень при прохождении лазерного луча могла образовываться при поглощении зондирующего излучения веществом, составляющим небольшую долю массы

флаера, например, плазмой, как было в наших ранних экспериментах [7], или слетевшей с тыльной поверхности флаера пылью [8]. Поэтому было неясно, какая часть массы флаера взаимодействует с мишенью.

В настоящей работе исследовался удар флаера из дюралюминия по изначально неподвижной мишени из вольфрама. По перемещениям флаера до удара и флаера совместно с мишенью после удара были оценены переданный от флаера к мишени импульс и доля массы, которая этот импульс передала. Целью данной работы являлось исследование эффективности передачи импульса от дюралюминиевого флаера к вольфрамовой мишени.

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Эксперименты проводились на установке Ангара-5-1 [9], генератор импульсной электрической мощности которой состоит из восьми модульных генераторов, включенных параллельно.

Для разгона флаеров и создания высоких давлений, была проведена модернизация концентратора – электродной системы, которая объединяет ток всех восьми модулей на общую нагрузку.

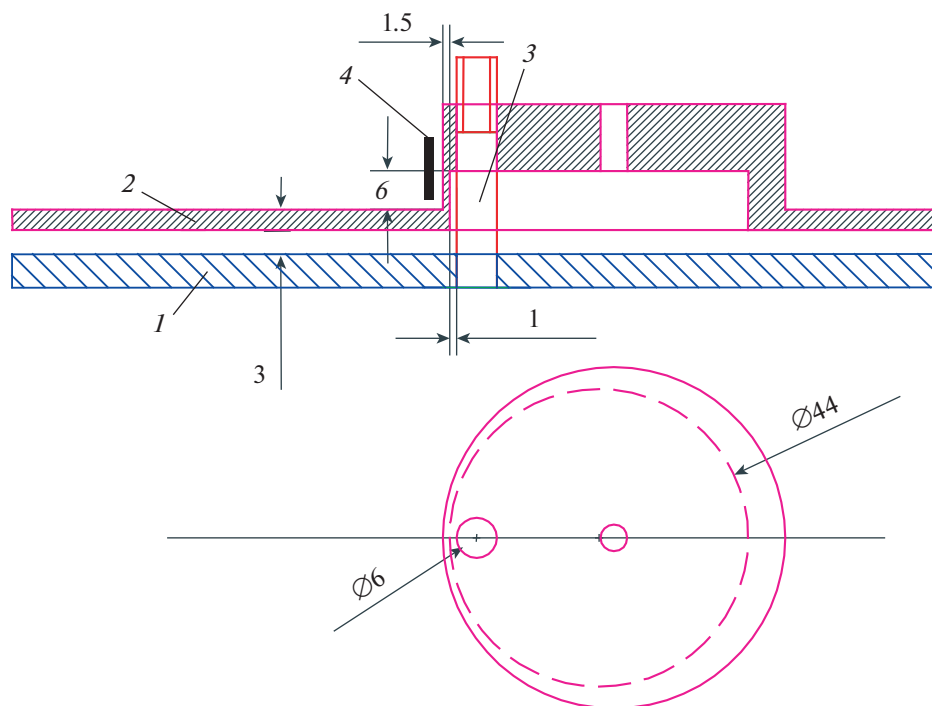


Рис. 1. Схема центральной части концентратора: 1 — анод; 2 — катод; 3 — стержень, соединяющий анод и катод; 4 — преграда из вольфрама толщиной 0.2 мм. Участок анода, имеющий размер 6 мм является флаером.

Это позволило несколько уменьшить индуктивность концентратора и, как следствие, увеличить ток через нагрузку и погонную плотность тока на ней.

Схема разгона флаера была опубликована в работах [4–6]. Схема центральной части концентратора показана на рис. 1. Внутренняя часть анода имеет анодную цилиндрическую полость диаметром 44 мм. Анод и катод соединены стержнем диаметром 6 мм. Благодаря асимметричному расположению стержня внутри полости ток в аноде концентрируется вблизи 1 мм зазора между стержнем и анодом. Поэтому в зазоре 1 мм между стержнем и расположенным вблизи участком анода создается сильное магнитное поле, масштаба 2 МГс. Этот участок анода размером 6 мм, указанный на рис. 1, является флаером. Под действием давления магнитного поля этот участок ускоряется наружу от анодной полости (налево на рис. 1). В качестве материала анода, а значит и флаера, использовался сплав алюминия — дюралюминий. Толщина флаера в этих экспериментах была 1.5 мм.

Полный ток, протекающий через лайнерную нагрузку, регистрировался с помощью стандартной системы магнитных зондов. Для контроля тока в анодной полости располагался миниатюрный магнитный зонд, аналогичный зонду использованному в [10]. Зонд опускался по оси

анодной полости через изображенное на рис. 1 отверстие.

1.1. Крепление флаера

В настоящей работе на расстоянии около 1 мм от исходной внешней границы флаера была установлена преграда из вольфрама толщиной 0.2 мм. Как видно на рисунке, преграда не доходит до нижней границы флаера. Таким образом, нижняя часть флаера не испытывает соударения с преградой, а верхняя соударяется с ней.

1.2. Регистрация перемещения флаера

Смещение флаера определялось по изображениям, полученным при теновом кадровом фотографировании. Для получения трех теновых изображений в каждом выстреле использовалась лазерная подсветка тремя пучками импульсного лазера SL-233 на длине волны 0.532 мкм с длительностью зондирующего импульса 0.1 нс; причем пучок во втором оптическом канале задержан относительно первого на 63.3 нс, а в третьем относительно второго на 58.5 нс. Лучи лазера были направлены в плоскость верхней части рис. 1. Оптическая система обеспечивала пространственное разрешение по объекту ± 50 мкм для первого и третьего каналов и ± 25 мкм для второго. Для возможности отдельной регистрации эти лучи



Рис. 2. Теневое лазерное изображение фляера с мишенью из вольфрама, полученное до выстрела в оптическом канале № 3. В левом верхнем углу для масштаба показан квадрат со стороной 1 мм. W – тень мишени из вольфрама.

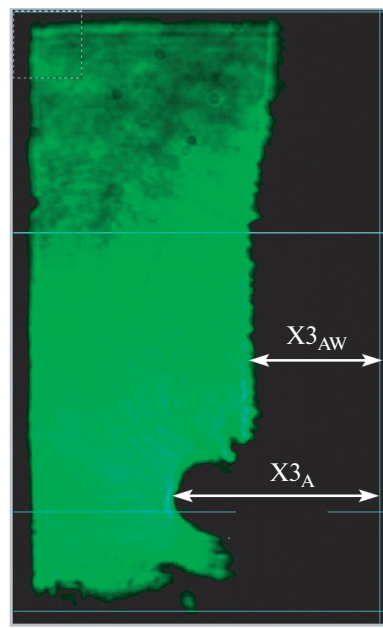


Рис. 3. Теневое лазерное изображение фляера с мишенью из вольфрама, полученное во время выстрела в оптическом канале № 3. В левом верхнем углу для масштаба показан квадрат со стороной 1 мм.

проходили вблизи фляера под разными углами с разностью 1.2° в горизонтальной плоскости.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

2.1. Величина тока

Получено, что в выходной части установки при межэлектродных зазорах около 3 мм ток с временем нарастания 150 нс достигает 4–5 МА, а линейная плотность тока на фляере – 4–5 МА/см. Начало тока в единой шкале времени на установке Ангара-5-1 составляет 770 нс со стандартным отклонением 4.4 нс.

2.2. Лазерное теневое зондирование

Ниже представлены результаты лазерного зондирования фляера.

На рис. 2 представлено теневое лазерное изображение дюралюминиевого фляера с мишенью из вольфрама, полученное до выстрела в оптическом канале № 3.

На рис. 3 представлено теневое лазерное изображение фляера с мишенью, полученное во время выстрела в канале № 3 в момент времени 1475 нс.

Видно, что мишень не доходит до нижнего края анода на изображении. Поэтому скорость дюралюминиевого фляера будет определяться по нижней части изображения, а совместная скорость фляера и мишени после удара – по

центральной его части. Как отмечалось, толщина мишени 0.2 мм, однако на рисунках тень от нее имеет размер больше, чем 0.2 мм. Это связано с протяженностью мишени вдоль луча и с тем, что лазерные лучи проходят под некоторым углом к плоскости мишени.

На рис. 2 видна тень от мишени из вольфрама. Расстояние $X3_w$ для кадра № 3 между исходным положением фляера и серединой вольфрамовой мишени будет использоваться при восстановлении траекторий движения.

На рис. 3 указаны: смещение левой границы тени ($X3_A$) для нижней части изображения, где фляер не сталкивался с мишенью и смещение ($X3_{Aw}$) левой границы тени, полученной в той части изображения, в которой происходит столкновение фляера с мишенью. На рисунках не представлены аналогичные кадры, полученные в оптических каналах № 1 и № 2, однако соответствующие смещения ($X1_A$, $X1_{Aw}$ и $X1_w$) и ($X2_A$, $X2_{Aw}$ и $X2_w$) будут далее использоваться при анализе результатов.

3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Первой задачей исследования было определить скорость дюралюминиевого фляера до столкновения и совместную скорость дюралюминиевого фляера с вольфрамовой мишенью после

удара. По отношению этих скоростей можно оценить, какая часть массы флаера принимала участие в передаче импульса мишени.

Скорость можно определять как дифференциальную dX/dt , где dX – смещение флаера между двумя кадрами зондирования в одном выстреле, а dt время между этими кадрами. Сложность решения этой задачи заключается в том, что при смещениях, больших 1 мм, передняя (рабочая) поверхность флаера начинает искажаться и расплываться, перестает быть плоской, форма флаера сильно искажается, а вследствие того, что лазерные лучи проходят вдоль флаера под разными углами, погрешность определения дифференциальной скорости оказывается весьма значительной.

В предыдущих экспериментах [4–6] было показано, что движение флаера в единой шкале времени на установке Ангара-5-1 начинается в момент времени 970 ± 30 нс. На рис. 4 показано смещение флаера из дюралюминия для разных выстрелов в разные моменты времени, представленное в работе [6]. Видно, что можно говорить о средней скорости $X/(t - t_0)$, где X – смещение флаера относительно исходного расположения, а t – момент времени зондирования в единой шкале времени; $t_0 = 970$ нс. При таком подходе погрешность определения средней скорости оказывается меньше.

Для восстановления траектории движения флаера без мишени со скоростью V_A и флаера с мишенью со скоростью V_{AW} использовались экспериментальные результаты ($X1_A, X1_{AW}$ и $X1_W$), ($X2_A, X2_{AW}$ и $X2_W$) и ($X3_A, X3_{AW}$ и $X3_W$), полученные по трем кадрам в каждом выстреле. Были сделаны следующие простейшие очень грубые предположения.

– Движение флаера как до удара о мишень, так и после удара, равномерное. Справедливость этого приближения следует из того, что временные масштабы действия тока (~ 150 нс) и движения флаера (~ 700 – 800 нс) сильно отличаются.

– Мишень имеет нулевую толщину, хотя время пробега звуковой волны по ней около 40 нс (в используемой модели даже более: и флаер и мишень считаются точечными объектами).

– Движение флаера без мишени равномерное со скоростью V_A и начинается в момент времени 970 нс со смещения 0 мм.

– Для подтверждения предыдущих двух пунктов была проведена оценка влияния давления “прорвавшегося” за флайером магнитного поля на ускорение мишени. При оценке величины магнитного давления на оторвавшийся флаер при его смещении на 2 мм, даже в предположении, что ток соответствует своему амплитудному значению, получено, что оно составляет 8% от вели-

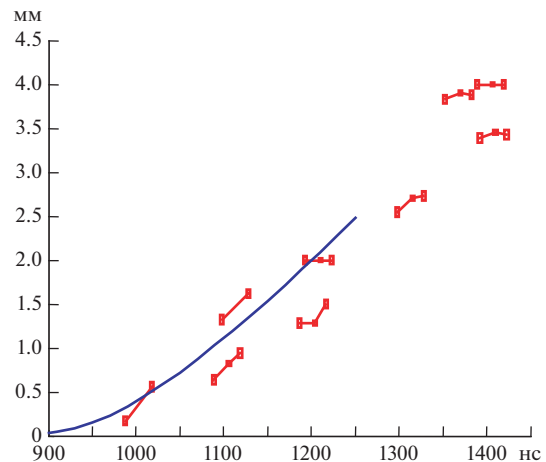


Рис. 4. Смещение флаера в разные моменты времени. По горизонтали показано время зондирования. Результаты, полученные в одном выстреле, соединены отрезками. Результаты моделирования представлены сплошной линией.

чины давления в исходном положении (до отрыва от основной части анода). Поскольку флаер может оторваться только через ~ 300 – 400 нс после начала импульса тока, так как к этому моменту ток практически прекратится, реальное давление будет еще меньше. Сказанное выше означает, что движение флаера как до удара о мишень, так и после удара вполне можно считать равномерным.

– При оценке импульса предполагается, что при столкновении флаер и мишень “слиплись” и далее летят как одно целое. Движение флаера совместно с мишенью после удара равномерное со скоростью V_{AW} и начинается в момент времени удара T_U для кадров 1, 2, 3 со смещений ($X1_W, X2_W, X3_W$) соответственно.

– Значения скоростей V_A, V_{AW} и времени удара T_U подбираются таким образом, чтобы наилучшим образом удовлетворить экспериментально измеренным в моменты зондирования значениям смещений для трех кадров ($X1_A, X2_A, X3_A$) и ($X1_{AW}, X2_{AW}, X3_{AW}$).

Используя эти величины зарегистрированных смещений для трех кадров ($X1_A, X2_A, X3_A$) и ($X1_{AW}, X2_{AW}, X3_{AW}$), и положение середины вольфрамовой мишени до удара ($X1_W, X2_W, X3_W$), были построены траектории движения как для той части флаера, которая не столкнулась с мишенью, так и для части флаера, претерпевшей соударение с мишенью. Значения полученных скоростей для флаера без мишени со скоростью V_A , флаера с мишенью V_{AW} и их отношения V_A/V_{AW} были получены только по измеренным смещениям и приведены в табл. 1. В качестве иллюстрации на рис. 5

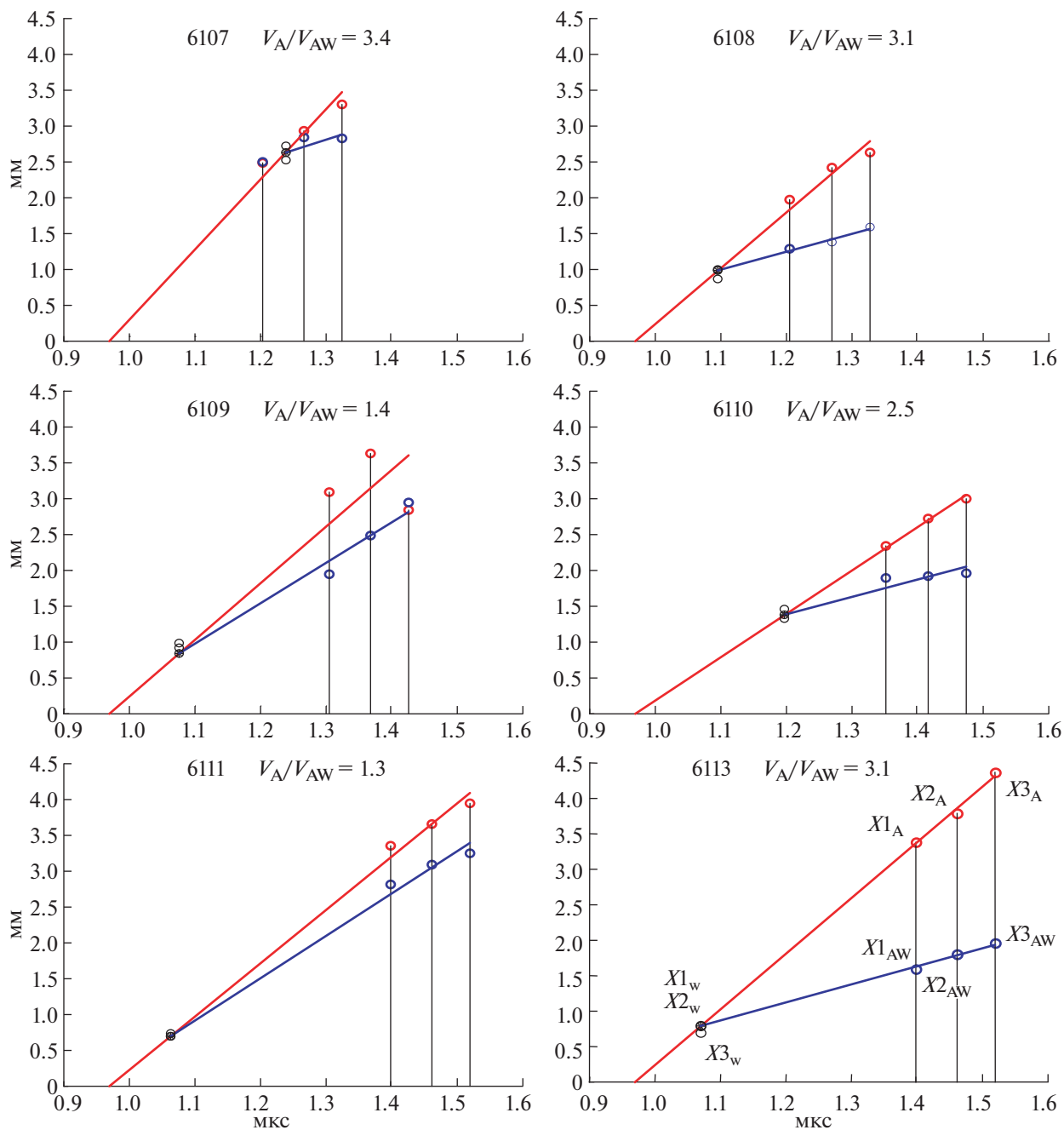


Рис. 5. Восстановленные траектории движения части дюралюминиевого флаера, не испытавшей столкновения с мишенью (верхняя наклонная кривая), и части дюралюминиевого флаера перемещающейся совместно с вольфрамовой мишенью после столкновения (нижняя наклонная кривая). Пересечение этих траекторий соответствует удару флаера об исходную мишень, середина которой для трех кадров отмечена тремя кружочками ($X1_w, X2_w, X3_w$). Времена получения кадров обозначены тремя вертикальными линиями. Верхние три кружочка ($X1_A, X2_A, X3_A$) соответствуют положениям части дюралюминиевого флаера, не столкнувшейся с мишенью, а нижние три кружочка ($X1_{AW}, X2_{AW}, X3_{AW}$) соответствуют положениям части дюралюминиевого флаера перемещающейся совместно с вольфрамовой мишенью после их столкновения. В верхней части каждого графика написан номер выстрела и отношение скоростей.

приведены смещения и восстановленные траектории движения для этих частей флаера.

Для разных выстрелов отношение скоростей V_A/V_{AW} лежит в пределах от 1.3 до 3.3. Такой разброс отношения скоростей объясняется низкой

точностью измерений, грубостью предположений, используемых при обработке, и разной величиной тока в разных выстрелах.

На основе этих данных интересно оценить в соответствии с законом сохранения импульса до-

Таблица 1. Восстановленные скорости V_A и V_{AW} , доля массы dm/m флаера, принявшей участие в ударе, и давления P в мишени, возникшее за ударной волной

Выстрел	V_A , км/с	V_{AW} , км/с	V_A/V_{AW}	dm/m	P , ГПа
6107	9.7	2.8	3.4	0.38	160
6108	7.7	2.4	3.1	0.43	140
6109	7.8	5.6	1.4	2.3	400
6110	5.8	2.2	2.5	0.61	100
6111	7.4	5.8	1.3	3.06	450
6113	7.8	2.5	3.1	0.46	150

лю массы дюралюминиевого флаера dm/m , которая принимала участие в ударе по вольфрамовой мишени. Плотность вольфрама при нормальных условиях равна 19250 кг/м^3 , толщина 0.2 мм, плотность дюралюминия при нормальных условиях равна 2790 кг/м^3 , толщина 1.5 мм. В предположении, что флаер и мишень после удара “слиплись” по закону сохранения импульса отношение скоростей до и после удара должно быть равно $(19250 \times 0.2 + 2790 \times 1.5)/(2790 \times 1.5) = 1.92$. В табл. 1 приведена доля массы dm/m дюралюминиевого флаера, принявшей участие в ударе. Эта доля лежит в пределах от 0.38 до 3.53. В разных выстрелах эта доля бывает как в 3 раза больше, так и в 3 раза меньше единицы, которая должна была быть, если бы вся масса флаера принимала участие в передаче импульса.

Несмотря на такой большой разброс результатов, на низкую точность измерений, грубость используемых при обработке предположений, полученный результат показывает, что в разных выстрелах эта доля отличается от единицы не сильно, не на порядок. Так что можно утверждать, что почти вся масса флаера из дюралюминия принимает участие в передаче своего импульса вольфрамовой мишени и далее перемещается с ней совместно. Это означает, что тень при лазерном зондировании была образована основной массой флаера, а не таким редким веществом как плазма или пыль.

Распространение ударных волн происходит в протяженном веществе, что противоречит рассматриваемой выше модели флаера и мишени с нулевой толщиной. Однако, оценив каким-либо образом скорость мишени после удара, можно вспомнить, что и флаер и мишень имеют некоторую толщину и в них возникают ударные волны с одинаковым давлением P за волновым фронтом.

Ударно-сжатый материал обеих пластин после удара начинает двигаться с одной и той же скоростью. Скорость и давление определяются с помощью законов сохранения массы и импульса [11], если известны ударные адиабаты веществ. Рассчитать ударные адиабаты материалов можно ис-

ходя из закона сохранения энергии [11] и уравнения состояния рассматриваемого материала. В настоящей работе использованы уравнения состояния дюралюминия и вольфрама, построенные на основе полумпирической модели [12]. Для нахождения состояния ударно-сжатого вещества бралась измеренная скорость свободной поверхности образца V_{AW} , и полагалось, что она равна удвоенной массовой скорости за фронтом ударной волны. Это позволило оценить давление P за волновым фронтом. В таблице представлены соответствующие измеренным скоростям давления P за фронтом ударной волны в мишени, которые возникают при ударе по ней флаера. Эти давления лежат в диапазоне 160–450 ГПа. Повторим, что такой разброс давлений объясняется низкой точностью измерений, грубостью предположений, используемых при обработке, и разной величиной тока в разных выстрелах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По теньвым изображениям измерены скорости движения тыльной стороны флаера V_A , в разных выстрелах они лежат в пределах от 6 до 10 км/с.

По теньвым изображениям измерены скорости движения тыльной поверхности мишени V_{AW} , в разных выстрелах они лежат в пределах от 2.2 до 5.8 км/с.

Для разных выстрелов отношение скоростей V_A/V_{AW} лежит в пределах от 1.3 до 3.3 что близко к величине 1.92, полученной в предположении, что в ударе участвует вся масса флаера.

По этим данным была оценена доля массы флаера dm/m , принимавшей участие в передаче импульса при ударе. Эта доля бывает как в 3 раза больше, так и в 3 раза меньше единицы т.е. отличается от единицы не сильно, не на порядок. Таким образом, можно утверждать, что почти вся масса флаера принимает участие в ударе и передает свой импульс вольфрамовой мишени. В последней при этом возникают давления 160–450 ГПа.

Экспериментальная часть работы поддержана Российским научным фондом (грант № 16-12-10487). Расчетная часть работы поддержана Президиумом РАН (программа фундаментальных исследований № 13 “Конденсированное вещество и плазма при высоких плотностях энергии”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаркушин Г.В., Игнатова О.Н., Канель Г.И., Мейер Л., Разоренов С.В. // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2010. № 8. С. 155.

2. *Lemke R.W., Knudson M.D., Bliss D.E., Cochrane K., Davis J.-P., Giunta A.A., Harjes H.C., Slutz S.A.* // *J. Appl. Phys.* 2005. V. 98. P. 073530.
3. *Deng J., Xie W., Huang X.* // *IEEE Intern. Conf. on Plasma Sciences.* 24-28 May 2015.
4. *Александров В.В., Браницкий А.В., Грабовский Е.В., Лаухин Я.Н., Олейник Г.М., Ткаченко С.И., Фролов И.Н., Хищенко К.В.* // *Ядерная физика и инжиниринг (ЯФИ)* 2018. Тр. IV Междунар. конф. “Лазерные, плазменные исследования и технологии” 30 января–1 февраля 2018 года, Москва, НИЯУ МИФИ. В печати.
5. *Oleinik G.M., Tkachenko S.I., Grabovski E.V., Alexandrov V.V., Branitskii A.V., Frolov I.N., Laukhin Ya.N., Gribov A.N., Shishlov A.O., Khishchenko K.V.* // *J. Phys.: Confer. Ser.* 2019. V. 1147. P. 012086.
6. *Grabovskii E.V., Alexandrov V.V., Branitskii A.V., Frolov I.N., Gribov A.N., Gritsuk A.N., Mitrofanov K.N., Laukhin Ya.N., Oleinik G.M., Satorov P.V., Shishlov A.O., Tkachenko S.I.* // *J. Phys.: Confer. Ser.* 2018. V. 946. P. 012041.
7. *Ткаченко С.И., Грабовский Е.В., Грибов А.Н., Олейник Г.М., Шишлов А.О., Митрофанов К.Н.* // *Изв. РАН. Сер. физ.* 2018. Т. 82. С. 448.
8. *Михайлов А.Л., Огородников В.А., Сасик В.С., Раевский В.А., Лебедев А.И., Зотов Д.Е., Ерунов С.В., Сырунин М.А., Садунов В.Д., Невмержицкий Н.В., Лобастов С.А., Бурцев В.В., Мишанов А.В., Кулаков Е.В., Сатарова А.В., Георгиевская А.Б., Князев В.Н., Клещевников О.А., Антипов Е.В., Глушихин В.В., Юртов И.В., Утенков А.А., Сеньковский Е.Д., Абакумов С.А., Пресняков Д.В., Калашник И.А., Панов К.Н., Аринин В.А., Ткаченко Б.И., Филев В.Н., Чапаев А.В., Андраманов А.В., Лебедева М.О., Игонин В.В.* // *ЖЭТФ.* 2014. Т. 145. С. 892.
9. *Альбикиов З.А., Велихов Е.П., Веретенников А.И., Глухих В.А., Грабовский Е.В., Грязнов В.М., Гусев О.А., Жемчужников Г.Н., Зайцев В.И., Золотовский О.А., Истомин Ю.А., Козлов О.В., Крашенинников И.С., Курочкин С.С., Латманнизова Г.М., Матвеев В.В., Минеев Г.В., Михайлов В.Н., Недосеес С.Л., Олейник Г.М., Певчев В.П., Перлин А.С., Печерский О.П., Письменный В.Д., Рудаков Л.И., Смирнов В.В., Царфин В.Я., Ямпольский И.Р.* // *Атомная энергия.* 1990. Т. 68. Вып. 1. С. 26.
10. *Зукакишвили Г.Г., Митрофанов К.Н., Александров В.В., Грабовский Е.В., Олейник Г.М., Порофеев И.Ю., Сасоров П.В., Фролов И.Н.* // *Физика плазмы.* 2005. Т. 31. С. 978.
11. *Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П.* *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений.* М.: Наука, 1966.
12. *Khishchenko K.V.* // *J. Phys.: Confer. Ser.* 2015. V. 653. P. 012081.