

ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЙ ЗА СЧЕТ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ДВУМЕРНЫМИ ВОЗМУЩЕНИЯМИ ПЛОТНОСТИ НА ЛАЗЕРНОЙ УСТАНОВКЕ «ИСКРА-5»

*А. В. Бабанов, М. А. Баринов, С. П. Баринов, Р. В. Гаранин, Н. В. Жидков,
Н. А. Калмыков, В. П. Коваленко, С. Н. Кокорин, А. В. Пинегин, Е. Ю. Соломатина,
И. И. Соломатин, Н. А. Сулов*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия

Представлены результаты серии экспериментов по исследованию гидродинамики процессов формирования течений за счет взаимодействия ударной волны с двумерными возмущениями плотности на лазерной установке «Искра-5». В экспериментах в схеме с точечным источником просвечивающего РИ с энергией квантов $\sim 4,5$ кэВ зарегистрированы теневые изображения струи, возникающей при воздействии ударной волны, созданной импульсом мягкого рентгеновского излучения из мишени-иллюминатора, на плоскую алюминиевую мишень с глухой цилиндрической полостью. Приведены оценки размеров и массы струи, выброшенной из алюминиевой полости ударной волной, сформированной мягким рентгеновским излучением из мишени-иллюминатора. Проведено сравнение результатов эксперимента с результатами численного моделирования формирования и динамики струи по двумерной методике МИД-НД2Д.

Введение

Создание мощных вычислительных машин позволяет реализовать комплексы программ решения двумерных и трехмерных гидродинамических задач для нужд различных областей народного хозяйства. В этих условиях высокую актуальность приобретает поиск условий, в которых можно получить экспериментальные данные для тестирования разрабатываемых комплексов и методов 2D и 3D моделирования на параллельных суперкомпьютерах. Мощные лазерные установки позволяют создать экспериментальные условия для моделирования динамики двумерных и трехмерных течений, возникающих при образовании струй с высоким числом Маха под действием ударных волн мегабарного диапазона давлений. Подобное моделирование двумерных и трехмерных течений постоянно проводится американскими исследователями, начиная с экспериментов на установке NOVA [1], продолжались на установке OMEGA2 [2] и будут продолжены на установке NIF [3]

Создаваемые во ВНИИЭФ комплексы программ решения двумерных и трехмерных гидродинамических задач могут быть верифицированы по результатам проведенных экспериментов и в

частности по ряду параметров, которые можно реализовать и измерить в условиях экспериментов на лазерных установках, а именно: пространственные размеры, характерные скорости, масса материала струи и её пространственное распределение.

В докладе представлены результаты экспериментальных исследований, проведенных на лазерной установке «Искра-5» по формированию течений при взаимодействии ударной волны с двумерными возмущениями плотности в виде цилиндрической полости. Полученные экспериментальные данные использованы для сравнения с результатами двумерной методики МИД-НД2Д, разрабатываемой во ВНИИЭФ.

1. Постановка экспериментов

Принципиальная схема постановки экспериментов по исследованию гидродинамики формирования течений при взаимодействии ударной волны с неоднородностью плотности в виде глухой цилиндрической полости в плоском диске методом рентгеновского просвечивания с квазиточечным источником излучения представлена на рис. 1.

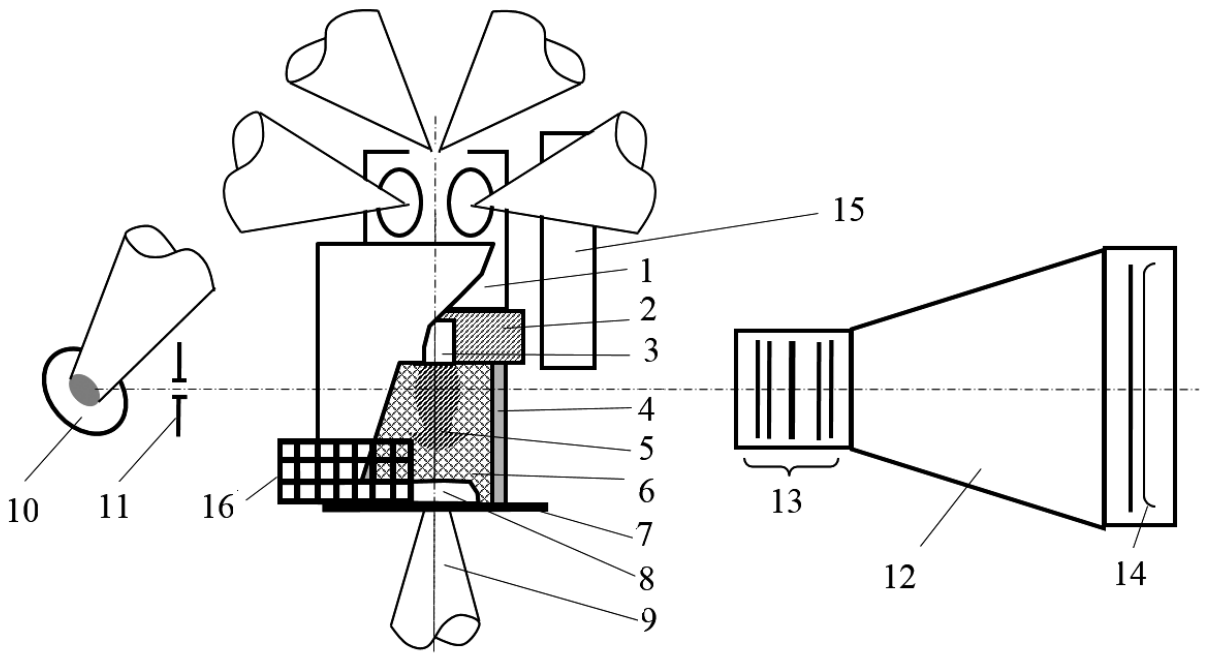


Рис. 1. Принципиальная схема постановки экспериментов по исследованию гидродинамических течений: 1 – мишень-иллюминатор; 2 – исследуемый образец; 3 – цилиндрическая полость; 4 – ударная трубка; 5 – струя; 6 – пена; 7 – фланец; 8 – экран с трапецевидным окном; 9 – держатель мишени; 10 – мишень просвечивающего РИ; 11 – точечная диафрагма; 12 – регистратор; 13 – набор фильтров; 14 – рентгеновская фотопленка; 15 – дополнительный защитный экран V-образной формы, 16 – масштабная сетка

Четыре или шесть (как на рис. 1) пучков лазерного излучения (ЛИ) установки Искра-5 вводятся в мишень-иллюминатор для конверсии энергии лазерного излучения в энергию квазипланковского рентгеновского излучения. Возникающее в иллюминаторе мягкое рентгеновское излучение (РИ) воздействует на исследуемый образец и формирует в нем ударную волну. Исследуемый образец представляет собой пластину с цилиндрической полостью на его тыльной поверхности. Ударная волна, распространяясь сквозь образец, нагревает его до плазменного состояния. Плазма со стенок полости заполняет её и формируется струя. Струя распространяется вдоль ударной трубки, заполненной низкоплотной пеной. Процесс динамики струи регистрируется путем просвечивания ударной трубки рентгеновским излучением от квазиточечного источника РИ, задержанного на определенный промежуток времени относительно момента облучения мишени-иллюминатора. Для защиты регистратора от рентгеновского излучения из мишени сборки на неё устанавливается экран с трапецевидным окном для наблюдения области распространения струи. Для защиты регистратора от РИ из отверстий для ввода вблизи мишени устанавливался дополни-

тельный защитный экран V-образной формы, который размещался между лазерными пучками.

Мишень-иллюминатор и мишень источника просвечивающего рентгеновского излучения облучались второй гармоникой ЛИ. Мишень источника просветки облучалась с заданной задержкой относительно момента нагрева мишени-иллюминатора.

Для получения контрастных теневых изображений струй просвечивание мишеней проводилось излучением от титановой ($h\nu \sim 4,75$ кэВ) или скандиевой ($h\nu \sim 4,32$ кэВ) мишени.

Теневое изображение мишени регистрировалось на рентгеновскую фотопленку УФ-4 с увеличением $M \approx 8$. Для определения коэффициента увеличения при регистрации изображений в некоторых опытах на мишени были установлены масштабные сетки с размером ячеек 130 мкм.

2. Конструкция мишени

Пример фотографии мишени в сборе приведен на рис. 2.

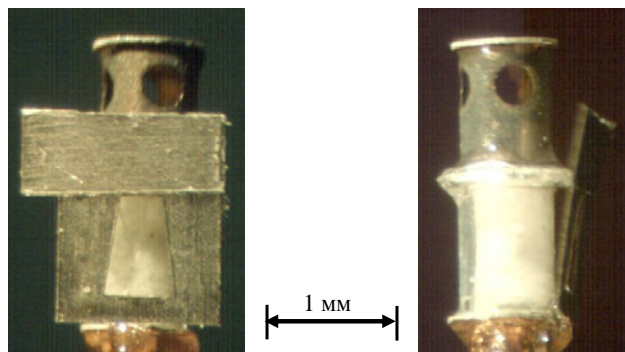


Рис. 2. Пример фотографии мишени в сборе (без масштабной сетки)

Иллюминатор представляет собой цилиндр диаметром 650 мкм и длиной 900 мкм; его стенка изготовлена из ППК толщиной 14 мкм. Глухой торец иллюминатора закрыт Al фланцем толщиной 20 мкм. Для ввода излучения на боковой поверхности иллюминатора изготовлено четыре отверстия диаметром по 300 мкм, расположенных симметрично по его периметру. Внутренняя поверхность иллюминатора и Al фланец покрыты слоем золота толщиной 2.7 мкм и 1.5 мкм соответственно.

Исследуемый образец изготовлен из двух Al дисков, плотно прижатых друг к другу на стенде сборки и склеенных по периметру эпоксидным клеем (см. рисунок 3). Один диск толщиной 50 мкм сплошной без отверстия, другой со сквозным цилиндрическим отверстием диаметром равным толщине диска.

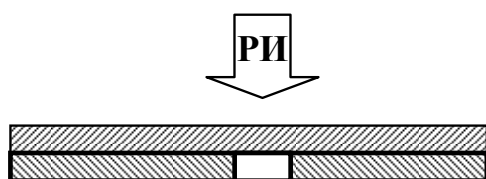


Рис. 3. Схема Al образца

Корпус ударной трубки диаметром 670 мкм и длиной 930–950 мкм изготовлен из СН толщиной 12 мкм. Трубка заполнена пеной плотностью $\rho \sim 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ г/см}^3$. В корпусе трубки вырезаны по два небольших прямоугольных окна напротив друг друга: окна размером 60×60 мкм – для фиксации клеем цилиндрической заготовки пены, чтобы обеспечить плотное её прилегание к Al-диску, другой конец заготовки должен быть свободным. Конец трубки закрыт фланцем диа-

метром $\sim 1 \text{ мм}$, к которому крепится держатель мишени.

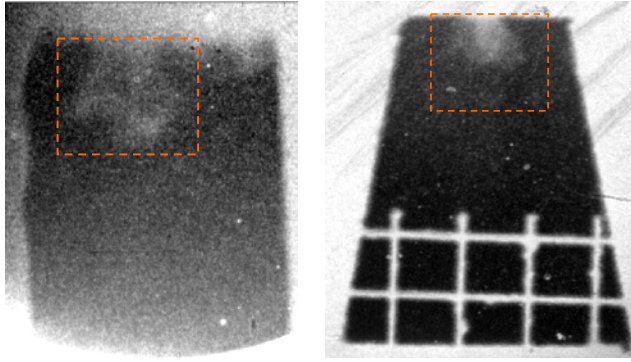
Для формирования точечного источника просвечивающего РИ использовалась диафрагма с отверстием $\sim \varnothing 20 \text{ мкм}$, изготовленная в Та-фольге толщиной около 25 мкм. На диафрагму с точечным отверстием для снижения фонового рентгеновского излучения от подсвечивающей мишени сквозь $\sim 30 \text{ мкм}$ Та фольгу, из которой она изготовлена, дополнительно была установлена диафрагма из Та фольги толщиной 100 мкм с отверстием диаметром $\approx 140 \text{ мкм}$. Для защиты диафрагм от рассеянного лазерного излучения от подсвечивающей мишени они были закрыты 6 мкм лавсановой пленкой.

3. Результаты экспериментов

В проведенной серии экспериментов использовались мишени с различными размерами полости в исследуемом Al образце, при этом диаметр полости примерно соответствовал её глубине. Энергия лазерного излучения, подведенная к мишени, изменялась в диапазоне $800 \div 1100 \text{ Дж}$. Задержка момента просвечивания мишени составляла 15 нс. Оценки температуры показали, что при параметрах лазерного излучения, реализованных в проведенных опытах, была достигнута температура рентгеновского излучения в боксе-конверторе $\approx 150 \pm 10 \text{ эВ}$.

Примеры теневых изображений струи, зарегистрированные в опытах, приведены на рис. 4.

На момент зондирования в обоих случаях струя имеет грибообразный вид. В оп. № 2 в верхней части изображения видна размытая граница пьедестала, образованного теневым изображением массы алюминия, выброшенной ударной волной с тыльной относительно иллюминатора поверхности Al диска с отверстием. Ширина основания струи практически совпадает с диаметром отверстия в Al диске, равным 90 мкм, а вершина струи отстоит от пьедестала на $\sim 180 \text{ мкм}$ и имеет большую ширину около 180 мкм. В оп. № 4 ширина основания струи составляет около 100 мкм, что примерно вдвое меньше диаметра отверстия в этом опыте. Вершина струи отстоит от пьедестала на $\sim 100 \div 120 \text{ мкм}$ и имеет ширину около 180 мкм. Хотя из-за слабого контраста полученных изображений приведенные размеры струи носят только оценочный характер, они указывают на влияние размера цилиндрического отверстия на характер формирования струи к моменту зондирования.



$E_{ли} \approx 1100$ Дж
Полость – $\varnothing 90 \times 95$ мкм
Подсветка Ti
($h\nu \approx 4.75$ кэВ)
Оп. № 2

$E_{ли} \approx 760$ Дж
Полость – $\varnothing 200 \times 200$ мкм
Подсветка
Sc($h\nu \sim 4.32$ кэВ)
Оп. № 4

Рис. 4. Результаты теневого рентгеновского просвечивания мишеней. Пунктирной линией выделены прямоугольные области, в которых наблюдается тень от сформировавшейся струи. Размер ячеек масштабной сетки 130×130 мкм

Для оценки массы Al в струе была проведена обработка полученных изображений по соотношению:

$$m_{Al} = -\frac{1}{\mu_{Al}} \sum \frac{I(r)}{I_0(r)} \cdot \left(\frac{\Delta x}{M}\right)^2,$$

где $I(r)$ и $I_0(r)$ – интенсивности теневого изображения и просвечивающего излучения в соответствующих точках в пределах выбранного фрагмента изображения, $I_0(r)$ на всем фрагменте определялась путем линейной интерполяции её значений на левой и правой границах изображения; Δx – шаг сканирования изображения, M – коэффициент увеличения, с которым зарегистрировано теневое изображение струи ($M = 8$); μ_{Al} – коэффициент поглощения РИ в Al, который аппроксимировался его значением для холодного алюминия при энергии квантов зондирующего излучения. При размерах полости $\varnothing 90 \times 95$ мкм масса струи, выброшенной из алюминиевой полости ударной в оп. № 2 по оценке составила $m_{Al} \sim 0,1$ мкг, а при размере полости $\varnothing 200 \times 200$ мкм в оп. № 4 $m_{Al} \sim 0,06$ мкг.

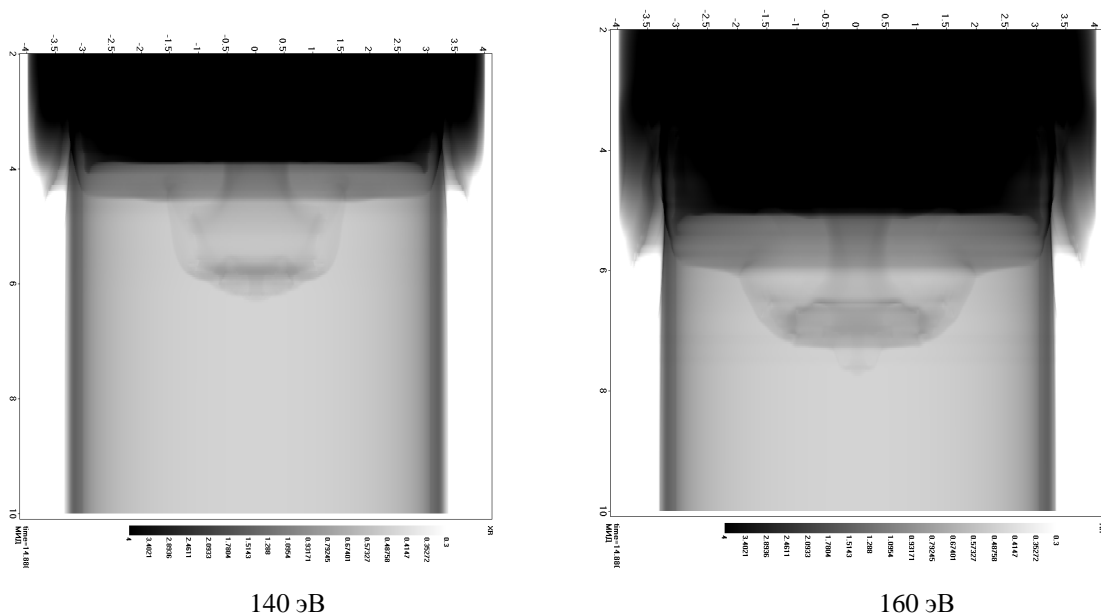
4. Разработка двумерной модели формирования струи

Возможности исследования процессов развития газодинамических неустойчивостей, влияния эффектов симметрии на конечные параметры крайне ограничены или вообще недоступны для одномерного моделирования. Вместе с тем, нестационарные и неравновесные эффекты, характерные для лазерной плазмы, оказывают существенное влияние на динамику движения мишени и на развитие возмущений. Все это определяет необходимость развития многомерных методик для расширения возможностей моделирования лазерной плазмы.

В настоящее время во ВНИИЭФ создана двумерная методика МИД-НД2Д, которая позволяет в разумные календарные сроки проводить расчёты по математическому моделированию экспериментов, выполняемых на лазерных установках.

Методика МИД-НД2Д позволяет рассчитывать большое число физических процессов таких, как: распространение и поглощение энергии лазерного излучения, газодинамическое движение плазмы в многотемпературном приближении, электронная и ионная теплопроводность, спектральный перенос рентгеновского излучения, термоядерные реакции, перенос энергии α -частицами, возникающими в термоядерных реакциях.

По методике МИД-НД2Д была проведена серия «пробных» расчётов по моделированию экспериментов по исследованию гидродинамики формирования двухмерных течений с параметрами образца из опыта № 2 (габарит полости – $\varnothing 90 \times 95$ мкм). В этих расчётах для реальной конструкции мишени (без учёта иллюминатора) с торца задавался поток РИ с максимальной равновесной температурой 140 и 160 эВ. На рис. 5 приведены расчётные распределения оптических толщин (интеграл от плотности вещества в струе вдоль направления наблюдения) на момент времени $t = 14,9$ нс.



140 эВ

160 эВ

Рис. 5. Расчётное распределение оптической толщины в струе на момент времени 14,9 нс для двух температур РИ – масштаб по осям в 100 мкм

Таблица 1

Расчётные параметры струи

$T_{\text{РИ}}, \text{эВ}$	$t, \text{нс}$	$m_{\text{Al}}, \text{мкг}$	$h, 100 \text{ мкм}$	$r, 100 \text{ мкм}$
140	13	0.55	2.27	1.14
	14.9	0.59	2.4	1.28
160	13	0.64	2.53	1.56
	14.9	0.67	2.66	1.85

В табл. 1 приведены расчётные параметры струи, а именно: m – масса Al в выброшенной струе, r – радиус струи и h – высота «отрыва» струи от пьедестала.

Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными показывает, что для габаритов полости $\varnothing 90 \times 95$ мкм геометрические размеры струи на момент зондирования в расчете примерно в два раза больше, чем в эксперименте, а масса алюминия в струе в 5–10 раз больше. Указанное обстоятельство может быть связано с отсутствием к настоящему моменту расчетов экспериментальных рентгенограмм с учетом распределения температуры и плотности в струе. Кроме того, следует учесть, что масса струи при обработке экспериментальных результатов оценивалась исходя из величины пробега зондирующего РИ в холодном, а не прогревом алюминии.

На данном этапе указанные различия в результатах предварительного расчета и проведенного эксперимента следует признать вполне удовлетворительными.

5. Отработка новой технологии изготовления цилиндрической полости

После проведения экспериментов было сделано предположение о возможном влиянии неизбежного технологического зазора между двумя слоями при изготовлении образца с цилиндрической полостью в проведенных экспериментах на формирование струи из-за неэффективного перехода ударной волны из сплошной пластины, при облучении которой формируется ударная волна, во вторую, с цилиндрической полостью, где должна формироваться струя. Это обстоятельство привело к необходимости отработки технологии изготовления цилиндрической полости в сплошном образце. Была отработана другая методика изготовления глухого отверстия, основанная на электроэрозионном сверлении. На рис. 6 приведена фотография глухого отверстия диаметром 110 мкм и его профиль, полученный на сканирующем интерферометре. Стрелка прогиба дна составляет примерно 15–20 мкм, а ширина переходной зоны 10–15 мкм. Полость изготовлена в алюминиевой фольге толщиной 200 мкм.

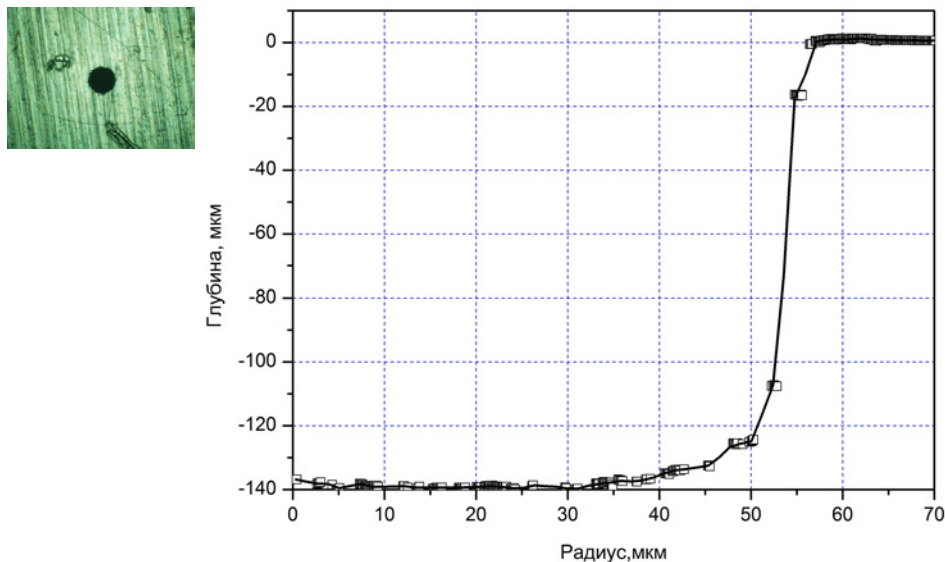


Рис. 6. Фотография и профиль глухого отверстия диаметром 110 мкм. Поверхность образца соответствует нулевому значению глубины

Заключение

На установке «Искра-5» проведена серия экспериментов по исследованию формирования и развития гидродинамических течений в присутствии двумерного возмущения плотности в виде цилиндрической полости.

Эксперименты проведены с алюминиевыми образцами с различными размерами цилиндрической полости $\varnothing 100 \times 100$ мкм, $\varnothing 150 \times 150$ мкм и $\varnothing 200 \times 200$ мкм. Нагрев образцов осуществлялся мягким РИ с эффективной температурой $T \sim 150$ эВ от мишеней-иллюминаторов при вводе в них четырех или шести пучков ЛИ с $\lambda = 0,66$ мкм с общей энергией от ≈ 760 Дж до ≈ 1200 Дж.

Для проведения экспериментов изготовлены мишени с масштабными сетками. Введено совершенствование в конструкцию точечного источника просвечивающего РИ: для защиты от РИ, проходящего сквозь фольгу точечной диафрагмы, на неё устанавливается дополнительная диафрагма из толстой, толщиной 100 мкм, Та фольги с отверстием диаметром 140 мкм, а для её защиты от рассеянного лазерного излучения на неё устанавливается лавсановый фильтр толщиной 6 мкм.

В экспериментах получены теневые изображения струи в рентгеновском излучении с энергией квантов $h\nu \approx 4,75$ кэВ от Ti-мишени и $h\nu \approx 4,32$ кэВ от Sc-мишени.

При размерах полости $\varnothing 90 \times 95$ мкм масса струи, выброшенной из алюминиевой полости ударной волной, сформированной мягким рентгеновским излучением из мишени-иллюминатора

при введенной энергии ЛИ около 1100 Дж, по оценке составила $m_{Al} \sim 0,1$ мкг, а при размере полости $\varnothing 200 \times 200$ мкм и энергии ЛИ 760 Дж $m_{Al} \sim 0,06$ мкг.

Отработана технология электроэрозионного изготовления «глухой» цилиндрической полости с плоским дном.

Предварительные результаты численного моделирования формирования и динамики струи по двумерной методике МИД-НД2Д показали, что её параметры существенно зависят от момента зондирования. Результаты моделирования для габаритов полости $\varnothing 90 \times 95$ мкм предсказывают геометрические размеры струи на момент зондирования примерно в два раза больше чем в эксперименте, а массу алюминия в струе в 5–10 раз больше. Указанные различия в результатах предварительного расчета и проведенного эксперимента на данном этапе следует признать вполне удовлетворительными.

Список литературы

1. NOVA ICF Annual Report Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, UCRL-LR-105820-98, p17-23, 1998.
2. OMEGA LLE 2006 Annual Report, DOE/SF/19460-723, p232, 2007.
3. NIF B. E. Blue, S.V. Weber, S. G. Glendinning, et. al. Experimental Investigation of High-Mach-Number 3D Hydrodynamic Jets at the National Ignition Facility Phys.Rev.Lett. 94, 095005 (2005).