

ЛАБОРАТОРНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 533.599+533.6.011.8+539.196.3+539.198+544.277+621.384.8

**ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СВЕРХЗВУКОВЫХ РАЗРЕЖЕННЫХ ГАЗОВЫХ
ПОТОКОВ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ**

©2025 г. А. С. Яскин^{а, **}, А. Е. Зарвин^{а, *}, В. В. Каляда^а, К. А. Дубровин^а,
В. Э. Художитков^а, Е. Д. Деринг^а, П. В. Ващенко^б, В. А. Лабусов^б

^а Новосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

^б Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, Новосибирск, просп. акад. Коптюга, 1

*e-mail: zarvin@phys.nsu.ru

**e-mail: yas@nsu.ru

Поступила в редакцию 06.03.2025 г.

После доработки 15.04.2025 г.

Принята к публикации 22.04.2025 г.

Специализированный сканер МАСИ-USB использован для оптических измерений, анализа формы и структуры сверхзвуковых недорасширенных газовых струй сложной формы в разреженном пространстве с давлением 0.2–20 Па. Свечение газа инициировалось сфокусированным пучком электронов с энергией около 10 кэВ. Сечения газовой струи получены равномерным перемещением струи относительно электронного луча. Продемонстрированы возможности использования сканирующей системы, разработанной на основе современных аппаратных и программных средств, для визуализации течений в сверхзвуковых струях со сложной конфигурацией потоков. Сочетание сканирования и фотовизуализации обеспечивает возможность более полного описания структуры сверхзвуковых потоков, в том числе в условиях кластированных течений.

1. ВВЕДЕНИЕ

При разработке космических аппаратов нового поколения для освоения ближнего и дальнего космоса актуализируется необходимость экспериментального моделирования истечения в разреженное пространство недорасширенных струйных течений от сопловых сборок двигателей систем коррекции орбиты, ориентации и маневрирования космической техники. Применяемые газодинамические установки должны не только воспроизводить при моделировании параметры натуральных течений, но и обладать высокопроизводительным

диагностическим оборудованием измерения газодинамических, энергетических и физико-химических параметров течения при низких давлениях.

Методы электронно-пучковой диагностики (ЭПД), основанные на анализе излучения, инициированного сфокусированным пучком электронов, развиваются с середины прошлого века [1–4]. Как неинвазивные они применялись для решения задач диагностики термодинамических параметров разреженного (число частиц менее 10^{22} м^{-3}) сверхзвукового газового потока: плотности частиц в газах и газовых смесях [5–8], определения колебательной и вращательной температуры газа [3, 5], формы и структуры потока [6, 7]. Электронный пучок в разреженных сверхзвуковых струях используется для измерения пространственного распределения плотности частиц в газовой струе спектральными методами [8–11]. Спектральные измерения при соответствующей градуировке являются достаточно точными, но недостаточно эффективными при исследовании сложных конфигураций течений, что существенно затрудняет их использование. Увеличить результативность измерений можно при использовании двумерной матрицы распределения интенсивности флуоресценции в плоскости сечения газового потока, равномерно перемещаемого относительно электронного луча. Зарегистрированная матрица интенсивности вместе с информацией, извлекаемой в виде изображения свечения потока, содержит также информацию о распределении частиц в сечениях потока.

Цель настоящей работы – совершенствование неинвазивных средств исследования сверхзвуковых разреженных струй путем использования метода сканирования потока в продольных и поперечных сечениях равномерным перемещением потока относительно электронного луча и регистрацией поля яркости свечения с помощью специализированного сканера МАСИ-USB на базе линейки фотодетекторов БЛПП-4000.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Работы выполнены на лабораторной вакуумной газодинамической установке ЛЭМПУС-2 [12] отдела прикладной физики ФФ НГУ. Исследуемые газовые потоки создаются в горизонтальной цилиндрической камере расширения объемом 0.46 м^3 истечением газа из соплового блока, смонтированного на координатном механизме (рис. 1). Сопловым блоком включает форкамеру, обеспечивающую стационарные давление P_0 и температуру T_0 торможения, а также сменные одиночные звуковые или сверхзвуковые сопла, либо сборку из нескольких сопел. Для моделирования газовых потоков сложной структуры используются сопловые сборки заданной конфигурации из двух или четырех одинаковых сверхзвуковых сопел (табл. 1).

Рис. 1. Сопловой блок: **а** – общий вид, **б** – сборка из двух вертикально расположенных сопел, **в** – из четырех сопел, расположенных в вершинах квадрата

Таблица 1. Геометрические параметры сопел сборки

Параметры сопел	Величина
Расстояние между соплами z_0 , мм	
Сборка из двух сопел	20.0
Сборка из четырех сопел	14.2
Диаметр конфузора d_k , мм	0.35
Длина конфузора l_k , мм	0.3
Диаметр критического сечения d_* , мм	0.272
Диаметр выходного сечения d_a , мм	1.44
Длина диффузора l_d , мм	3.30
Угол конуса конфузора $2\alpha_k$	60°
Угол конуса диффузора $2\alpha_d$	20°
Геометрическое расширение сопла $F = (d_a/d_*)^2$	28.0
Число Маха на срезе сопла M_a	
Аргон	7.4
Азот	5.1

Абсолютное давление в камере расширения в диапазоне 0.013–20 Па с погрешностью не более 0.2% измеряется мембранно-емкостным вакуумметром CDG-500, показания которого не зависят от состава газа или газовой смеси. Давление в форкамере сопла контролируется в диапазоне 0.01–1 МПа с погрешностью 0.25% от максимального давления с помощью абсолютного мембранного измерителя Siemens Sitrans P7MF1564. Производительность системы откачки установки позволяет поддерживать установленное программой эксперимента стационарное значение давления остаточного газа в камере расширения в режиме непрерывного истечения газа из сопла. Температуры торможения T_0 и в окружающем струю пространстве T_b контролируются термометрами (погрешность измерения около 0.1%).

Координатный механизм обеспечивает равномерное перемещение соплового блока на заданное программой измерений расстояние вдоль оси камеры расширения (до 250 мм) и в ортогональных к оси направлениях (по 200 мм). Перемещается сопловой блок шаговыми двигателями с шагом 0.015 мм.

Свечение в исследуемом газовом потоке возбуждается сфокусированным пучком электронов с энергией около 10 кэВ, генерируемых источником электронов с плазменным катодом [13–15]. Источник электронов совместно с системой фокусировки обеспечивает хорошо сфокусированный электронный пучок диаметром около 1 мм, пересекающий сверхзвуковой газовый поток, истекающий из соплового блока.

Инициированное электронным пучком излучение частиц регистрируется через кварцевое окно камеры расширения. Оптическая схема регистрации приведена на рис. 2.

Рис. 2. Оптическая схема регистрации инициированного электронами свечения.

Ось Z сфокусированного электронного пучка 4, генерируемого источником электронов 3, перпендикулярна оптической оси Y системы регистрации свечения потока, состоящей из кварцевого окна 5, кварцевой линзы 6 и регистрирующего прибора 7 (сканер, фотокамера). При регистрации газового потока фотокамерой линза из системы удаляется. Для получения фотоизображений струй использован фотоаппарат Nikon D7200 с КМОП-матрицей формата DX размером $23.5 \times 15.6 \text{ мм}^2$ (разрешение 6000×4000 пкс) с длиннофокусным объективом AF-S NIKKOR 18–300 мм. Поскольку времена жизни возбужденных атомов могут достигать нескольких десятков секунд, при средней скорости частиц потока более 500 м/с излучающих частиц оказывается достаточно для отображения структурных элементов потока за пределами возбуждающего электронного пучка. Из-за рассеяния сфокусированного пучка электронов на фоновых частицах и дрейфа вторичных электронов к заземленному соплу излучение наблюдается как вверх, так и вниз по потоку. Излучение газового объекта (сверхзвуковой струи) достаточно интенсивное (наблюдается глазом), поэтому чувствительности фотоаппарата достаточно для получения изображений изучаемого объекта. Фоторегистрация визуализированной картины течения позволяет фиксировать форму и структуру потока, а также анализировать (к сожалению, только качественно) зоны перепада плотности. Съемка проводилась с использованием программы дистанционного управления камерой “Camera Control Pro 2.23.0”. Подбор параметров съемки осуществлялся в ручном режиме камеры и согласовывался с режимом активации люминесценции частиц газового потока. Ток электронов измеряется в цепи коллектора электронов 8, используемого для отвода неиспользованной энергии разряда. Исследуемый газовый поток 2 истекает из соплового блока форкамеры 1, установленной на координатном устройстве 9.

3. РЕАЛИЗАЦИЯ ДВУМЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ СВЕРХЗВУКОВОГО ГАЗОВОГО ПОТОКА

Сканирование полей течения сверхзвуковых сильно недорасширенных затопленных струй в разреженной среде позволяет получить изображение сечений потока и двумерную матрицу яркости этих сечений, при обработке которых можно оценить распределение плотности частиц в анализируемом потоке. Ранее, на этапе апробации системы сканирования [16], использовалась матрица портативного ручного сканера документов iScan Wireless с низкой битовой глубиной серого (8 битов, 256 значений) и относительно низким разрешением линейки фотодетекторов (600 dpi). Авторы продемонстрировали ряд преимуществ сканирования газовых потоков

электронным лучом для описания полей течения по сравнению с фотографированием и традиционной спектроскопией. Однако данный вариант сканирующего прибора имел низкие чувствительность и разрешающую способность. Устройство не позволяло также непосредственно обращаться к матрице изображения, сохраняемого в формате “jpg”, что усложняло анализ экспериментальных результатов и дополнительно снижало разрешение введением дополнительных процедур преобразования изображений сечения в массив цифровых данных.

В настоящей работе изучена возможность использования в диагностических целях специализированного сканера МАСИ-USB ООО “ВМК-Оптоэлектроника” с линейкой фотодетекторов БЛПП-4000 [17–19] с собственным адаптивным программным обеспечением для сбора и анализа экспериментальных данных. Линейка фотодетектора БЛПП-4000, выполненная по КМОП-технологии, содержит 4096 фотоячеек высотой 0.2 мм с шагом структуры 0.007 мм и обеспечивает линейное разрешение 3600 dpi, спектральный диапазон чувствительности 160–1100 нм, битовую глубину серого 16 битов (65 536 значений), зарядовую емкость фотоячейки 80 тыс. e^- , шум считывания $16 e^-$ и динамический диапазон $5 \cdot 10^3$. С учетом коэффициента увеличения оптической системы ($\beta = 0.45$) одной фотоячейке детектора соответствует элемент поверхности сечения сканируемого потока 0.016 мм вдоль оси Z и 0.45 мм вдоль перпендикулярной к ней оси X . Вдоль оси Y разрешение сканирования определяется поперечным размером электронного луча, оно равно примерно 1 мм.

Результаты сканирования сохраняются в графическом виде и виде двумерных массивов значений. Графический файл предоставляет экспрессную информацию после завершения сканирования о распределении численной плотности в анализируемых сечениях газового потока в виде поля яркости изображения. Программное обеспечение сканера содержит программный модуль “отладка”. В этом режиме на экран монитора выводится зависимость интенсивности профиля сканирования от координаты ($I = I_{y,z=\text{const}}(x)$, $I = I_{x,z=\text{const}}(y)$) или интенсивности в точке ее контроля $I = I_{xyz}(t)$ при юстировке сканера. Наличие отладочного режима существенно упрощает и сокращает время на проведение юстировочных процедур при подготовке сканера к измерениям.

На рис. 3а показан результат сканирования продольного сечения газовой струи азота за сборкой из двух одинаковых сопел (рис. 1б, табл. 1). Угол между плоскостью, проходящей через сопла сборки и вертикалью, в измерениях не превышал 4° – 5° (рис. 3б, в). Яркие области в плоскости сечения (рис. 3а) соответствуют высокой численной плотности молекул азота. Сверхзвуковой поток при истечении из сопел образует две веретенообразные струи, скачки отражения которых, формируемые при несимметричном отражении в области смыкания струй, образуют новое смыкание составного потока на оси симметрии системы.

Рис. 3. Электронно-пучковая визуализация сверхзвукового потока азота, истекающего из двух-сопловой вертикальной сборки...

На рис. 3г приведена фотовизуализация того же потока. Сопоставление результатов визуализации и сканирования свидетельствует о полном геометрическом соответствии друг другу обоих результатов и совпадении полей яркости изображений. Существенным различием фотовизуализации и сканирования является то, что сканирование отражает именно распределение плотности частиц в потоке, в то время как фотовизуализация отражает распределение молекул азота с большим временем жизни вниз по потоку относительно электронного луча и возбуждаемых рассеянными электронами вверх по потоку. Следует отметить симметричность блочной струи на фотографии при небольшой асимметрии результата сканирования, заметной при сравнении рис. 3а и 3г. Это различие является результатом погрешности юстировки продольной плоскости сканирования и ее смещения от плоскости XZ сопловой сборки примерно на 1 мм вдоль оси Y в сторону верхнего сопла.

Рисунок 4 иллюстрирует применение сканера для изучения полей яркости (плотности частиц) сверхзвукового потока аргона за сопловой сборкой из четырех одинаковых равноудаленных от оси симметрии сопел (табл. 1), образующих квадрат (см. рис. 1в). На рис. 4а, а также 4и, на котором тот же результат представлен после дополнительной обработки двумерной матрицы яркости свечения, показано изображение продольного сечения потока вдоль оси симметрии сборки (ось X), на рис. 4в–з – изображения поперечных сечений потока на различных расстояниях от соплового блока. Профили отражают сложный характер течения, обусловленный взаимным влиянием струйных течений за соплами сборки. Струи газа, не взаимодействующие на расстоянии менее 15 мм ($20\text{--}22 r_a$), далее интенсивно смешиваются, создавая сложное распределение численной плотности атомов аргона в пространстве. Конфигурация возникающих структур полей плотности частиц и их пространственное изменение с удалением от соплового блока наглядно выявляются при использовании поперечных сечений потока (рис. 4в–з). Устанавливая в соответствии с программой моделирования необходимое число сечений и продольных областей контроля потока за сборкой сопел, можно определить конфигурацию поля струи с заданной детализацией. В частности, можно отметить, что после схождения скачков плотности на оси X формируется осесимметричная структура с ромбоподобным профилем сечения, диагонали которой ориентированы по вертикали и горизонтали, т.е. поворачиваются относительно конфигурации сопел сборки на $\pi/4$ (рис. 4е–з). Ранее аналогичный поворот в сложных составных течениях за сборкой из четырех сопел отмечен в работе [20].

Рис. 4. Регистрация сверхзвукового потока аргона за сборкой из одинаковых сопел, расположенных в вершинах квадрата...

Следует отметить, что изображение, полученное методом фотовизуализации, основанным на регистрации послесвечения, инициированного статичным сфокусированным пучком электронов, расположенным на расстоянии 30 мм от среза сопел (рис. 4б), демонстрирует иную структуру, нежели изображение, полученное методом сканирования (рис. 4а). Сканер, использованный в работе, регистрирует исключительно быстрые переходы, наблюдаемые непосредственно в области электронного пучка. Фотографическое изображение определяется свечением атомов как с малым, так и с большим временем жизни в возбужденном состоянии. Свечение между газовым источником и электронным пучком (перед областью возбуждения первичным электронным лучом) определяется преимущественно воздействием на газовый поток вторичных рассеянных электронов. Продемонстрированное различие в визуализациях проявляется вследствие того, что в данном случае рассмотрен режим с развитой конденсацией (средний размер кластеров в потоке равен $\langle S \rangle = 300$). В этом режиме в потоке происходит формирование “кластерного следа”, имеющего слабозатухающее послесвечение, обусловленное релаксацией энергии возбуждения внутри кластеров [21]. Наложение “кластерных следов” всех четырех струй, по-видимому, приводит к образованию на оси потока протяженной тонкой яркой структуры с большим количеством излучающих центров. Данный результат показывает, что для получения более полной информации о течениях в режимах с конденсацией необходимо применение двух методов одновременно.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено использование сканера для исследования сверхзвуковых разреженных струй за соплом субмиллиметрового размера на малогабаритной установке со сравнительно низким расходом рабочего газа. Метод сканирования продольных и поперечных сечений разреженных газовых потоков электронным лучом реализован путем применения научного сканера МАСИ-USB на базе линейки фотодетекторов БЛПП-4000. Погрешность восстановления геометрии течений описанным методом зависит от выбора оси сканирования, но не превышает 1 мм. Данный предел погрешности определяется поперечным размером сфокусированного электронного луча, запаздыванием по времени реального останова моторов координатного устройства в соответствии с командами записи регистрирующей системы сканера, а также размытыми границами скачков плотности частиц газового потока.

При анализе газовых потоков сложной формы сочетание измерений полей яркости сканируемых сечений с фотовизуализацией обеспечивает возможность более полного описания изучаемого газового объекта, в том числе учет пространственного распределения частиц с разными временами жизни в возбужденных состояниях.

В целом полученные результаты демонстрируют широкие возможности использования сканирующей системы, разработанной на основе современных аппаратных и программных средств, для визуализации течений в сверхзвуковых струях со сложной конфигурацией потоков.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Прикладная физика” НГУ.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (грант № FSUS-2025-0008).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Schumacher B.W., Gadamer E.O.* // Can. J. Phys. 1958. V. 36. P. 659. <https://doi.org/10.1139/p58-071>
2. *Muntz E.P., Marsden D.J.* // Rarefied Gas Dynamics. 1963. V. II. P. 495.
3. *Muntz E.P., Abel S.J., Maguire B.L.* // IEEE Transactions on Aerospace. 1965. V. AS-3. № 2. P. 210. <https://doi.org/10.1109/ta.1965.4319804>
4. *Gochberg L.A.* // Prog. Aerosp. Sci. 1997. V. 33. P. 431, 461. <https://doi.org/10.1016/S0376-0421%2897%2900002-X>
5. *Muntz E.P.* // Phys. Fluids. 1962. V. 5. P. 80. <https://doi.org/10.1063/1.1706495>
6. *Maguire B.L., Muntz E.P., Mallin J.R.* // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 1967. V. 2. P. 321. <https://doi.org/10.1109/TAES.1967.5408758>
7. *Rothe D.E.* // AIAA J. 1965. V. 3. No 10. P. 1945. <https://doi.org/10.2514/3.3286>
8. *Бочкарев А.А., Косинов В.А., Приходько В.Г., Ребров А.К.* // ПМТФ. 1970. № 5. С. 158.
9. *Ребров А.К., Чекмарев С.Ф., Шарафутдинов Р.Г.* // ПМТФ. 1971. № 1. С. 136.
10. *Alofs D.J., Flagan R.C., Springer G.S.* // Phys. Fluids. 1971. V. 14. P. 529. <https://doi.org/10.1063/1.1693466>
11. *Rothe D.E.* // Phys. Fluids. 1966. V. 9. P. 1643. <https://doi.org/10.1063/1.1761919>
12. *Zarvin A.E., Kalyada V.V., Madirbaev V.Zh. et al.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2017. V. 45. P. 819. <https://doi.org/10.1109/TPS.2017.2682901>
13. *Osipov I., Rempe N.* // Rev. Sci. Instrum. 2000. V. 71. P. 1638. <https://doi.org/10.1063/1.1150510>
14. *Корнилов С.Ю., Ремпе Н.Г.* // Доклады ТУСУР. 2017. Т. 20. № 3. С. 46. <https://doi.org/10.21293/1818-0442-2017-20-3-46-61>

15. <http://www.tetacom.ru>
16. Яскин А.С., Каляда В.В., Зарвин А.Е., Чиненов С.Т. // ПТЭ. 2020. № 3. С. 152. <https://doi.org/10.31857/S0032816220030180>
17. <http://www.vmk.ru>
18. Ващенко П.В., Лабусов В.А., Шиманский Р.В. // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2022. Т. 88. № 1-II. С. 22. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2022-88-1-II-22-26>
19. Лабусов В.А., Бехтерев А.В., Гаранин В.Г. // Аналитика и контроль. 2021. Т. 25. № 4. С. 262. <https://doi.org/10.15826/analitika.2021.25.4.002>
20. Yarygin V.N., Gerasimov Yu.I., Krylov A.N., Mishina L.V., Prikhodko V.G., Yarygin I.V. // Thermophys. Aeromech. 2011. V. 18. № 3. P. 333. <https://doi.org/10.1134/S0869864311030012>
21. Зарвин А.Е., Яскин А.С., Каляда В.В. // ПМТФ. 2018. Т. 59. С. 99. <https://doi.org/10.15372/PMTF20180111>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис. 1.** Сопловой блок: **а** – общий вид; **б** – сборка из двух вертикально расположенных сопел; **в** – из четырех сопел, расположенных в вершинах квадрата
- Рис. 2.** Оптическая схема регистрации инициированного электронами свечения: 1 – сопловой блок, 2 – сверхзвуковая струя, 3 – источник электронов, 4 – электронный пучок, 5 – кварцевое окно, 6 – кварцевая линза, 7 – регистрирующий прибор (сканер, фотокамера), 8 – коллектор электронов, 9 – блок перемещения.
- Рис. 3.** Электронно-пучковая визуализация сверхзвукового потока азота, истекающего из двухсопловой вертикальной сборки. Результат измерений сканером MACI-USB продольного сечения потока в плоскости XZ при $y = 0$ (**а**), поперечного сечения потока в плоскости YZ при $x = 40$ мм (**б**) и $x = 80$ мм (**г**), визуализация фотокамерой Nikon D7200 при $P_0 = 200$ кПа и $P_b = 2.5$ Па (**г**).
- Рис. 4.** Регистрация сверхзвукового потока аргона за сборкой из одинаковых сопел, расположенных в вершинах квадрата, путем сканирования (**а**, **в–и**) и с помощью фотовизуализации (**б**) при $P_0 = 200$ кПа, $P_h = 2.5$ Па. Стороны квадрата ориентированы горизонтально и вертикально: **а**, **и** – продольное сечение в вертикальной плоскости, проходящей через ось симметрии X ; **в–з** – поперечные сечения в точках с $x = 10, 30, 55, 120, 130, 170$ мм соответственно.



Рис. 1.

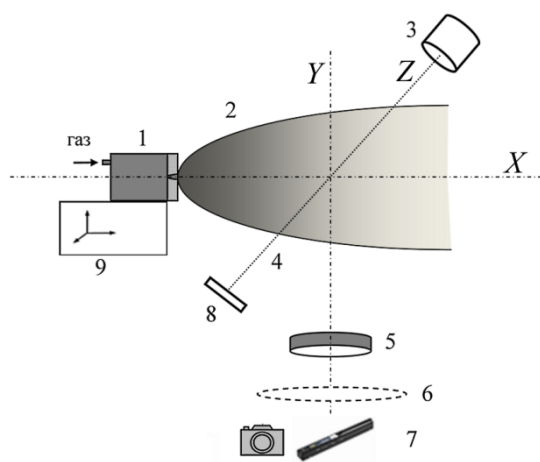


Рис. 2.

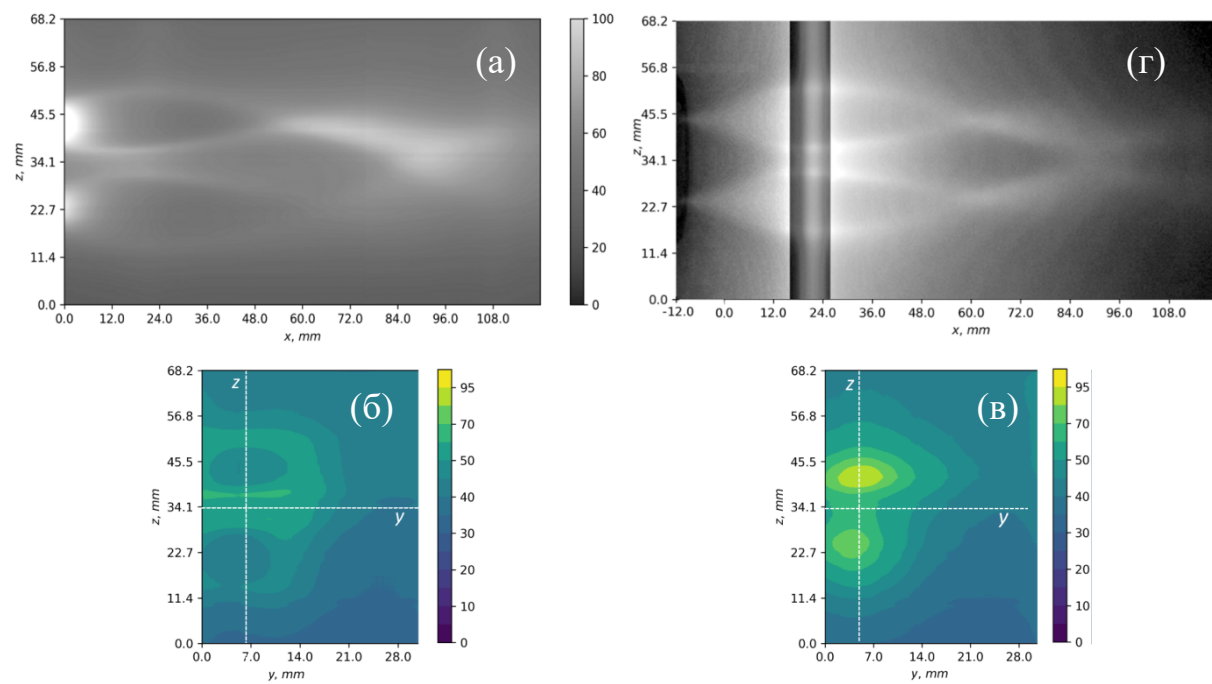


Рис. 3.

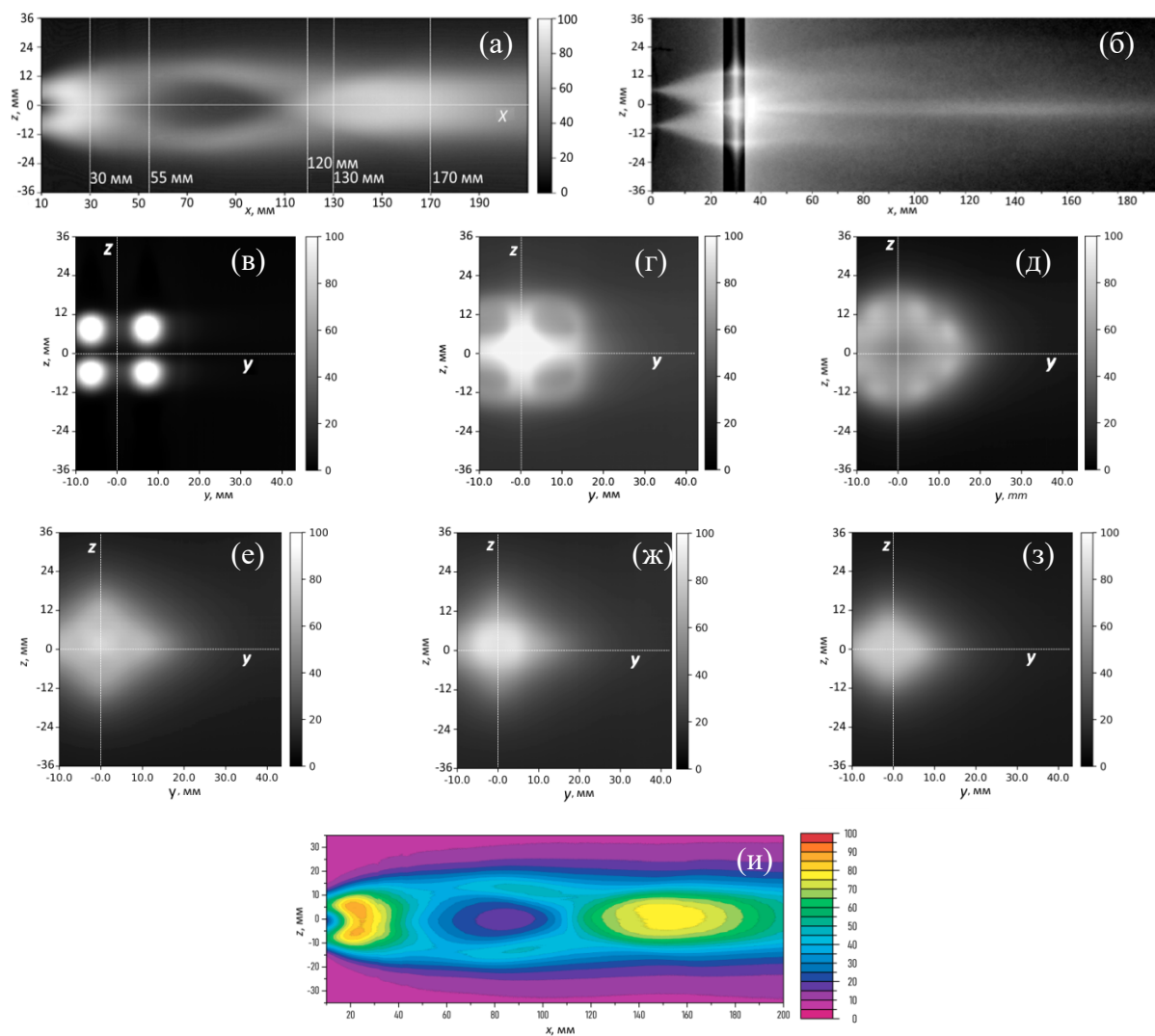


Рис.4.