

## МЕТОД ЭФФЕКТИВНОГО СКАНИРОВАНИЯ СВЕРХЗВУКОВЫХ СТРУЙ РАЗРЕЖЕННЫХ ГАЗОВ

© 2020 г. А. С. Яскин<sup>а,\*</sup>, В. В. Каляда<sup>а</sup>, А. Е. Зарвин<sup>а,\*\*</sup>, С. Т. Чиненов<sup>а</sup>

<sup>а</sup> Новосибирский государственный университет  
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

\*e-mail: yas@nsu.ru

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

Поступила в редакцию 26.12.2019 г.

После доработки 26.12.2019 г.

Принята к публикации 15.01.2020 г.

Разработан метод визуализации сверхзвуковых недорасширенных газовых струй, истекающих из звуковых и сверхзвуковых сопел в разреженное пространство с давлением 0,2–100 Па. Метод основан на возбуждении свечения газа струи, перемещающейся по заданной программе относительно сфокусированного пучка электронов диаметром <1 мм. Свечение возбужденного газа считывается сканером и преобразовывается в изображение. Численная плотность газа струи определяется по яркости изображения с помощью разработанного программного обеспечения.

DOI: 10.31857/S0032816220030180

### ВВЕДЕНИЕ

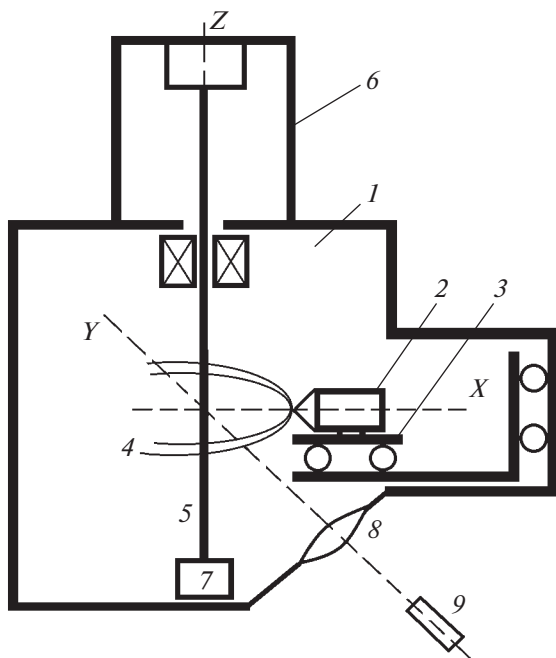
Фотографический метод является неотъемлемой частью многих газодинамических экспериментов. Главным его преимуществом является прямая визуализация исследуемых течений, позволяющая получать наглядные представления об изучаемом процессе. Помимо этого, инструментальная обработка полученных изображений в некоторых случаях позволяет определить распределение плотности газа в потоке.

В сложных струйных потоках, расширяющихся в вакуум или сильно разреженное пространство при сравнительно низких температурах, собственное свечение отсутствует. Поэтому для измерения газодинамических параметров таких потоков используется инициация вынужденного свечения, как правило, разрядом либо электронным пучком. Наиболее успешно электронный пучок в разреженных сверхзвуковых струях используется для измерения спектроскопическими методами поточечного пространственного распределения плотности частиц в газовой струе. Спектральные измерения при соответствующей градуировке являются достаточно точными, но малоэффективными при исследовании сложных конфигураций течений, что существенно затрудняет их использование.

При фотометрировании возбужденного электронами свечения в выделенном участке спектра в условиях равномерной, стабильной и контролируемой плотности тока электронного пучка яркость пикселей на фотографиях пропорциональ-

на плотности газа. Для получения картины течения необходимо либо использовать равномерный, проходящий через весь исследуемый объект электронный луч и охватывать одним кадром всю картину [1], либо узко сфокусированным электронным лучом при перемещении соплового блока с истекающей стационарной струей получать серию фотографий [2]. При использовании второго варианта в дальнейшем необходимо выделить центральную область свечения газа, образованную при взаимодействии с первичными высокоэнергетичными электронами, и соединить вырезанные области в целое изображение. Неравномерность широкого луча в первом случае и сложность процедуры состыковки изображений узкого электронного луча во втором приводят к искажению получаемых картин. Поэтому метод фоторегистрации используется, как правило, только для визуализации течений.

Несколько десятилетий назад при исследованиях сверхзвуковых течений в вакуумных камерах сотрудники Института теплофизики СО АН СССР предложили использовать метод так называемого фоторегистра (или фоторегистратора). В этой разработке на объектив фотоаппарата надевалась узкая коллимирующая щелевая диафрагма. Изображение неподвижного светящегося столба газа, возбужденного узким электронным лучом, фокусировалось с помощью оптики на входную щель этого фотоаппарата. Устройство предусматривало равномерное перемещение фотопленки отно-



**Рис. 1.** Схема газодинамических измерений со сканером. 1 – вакуумная камера; 2 – форкамера с соплом; 3 – устройство перемещения сопла в трех плоскостях; 4 – сверхзвуковая струя; 5 – электронный пучок; 6 – источник электронов с собственной вакуумной откачкой и системой фокусировки; 7 – коллектор электронов; 8 – оптическая линза; 9 – сканер. X, Y, Z – оси координат.

сительно щелевой диафрагмы, соответственно изображение светящегося столба газа развертывалось во времени.

Если при этом одновременно включить перемещение сверхзвуковой струи относительно неподвижного электронного пучка, на фотопленке появлялся негатив изображения, соответствующий изменению плотности газа на разных расстояниях от сопла. Далее, при равномерной засветке негатива в фотоувеличителе и равномерном проявлении пленки экспериментатор получал изображение интересующего участка струи, на котором более темные участки соответствовали большей газовой плотности.

При подборе скоростей перемещения сопла, фотопленки и вычисления масштаба можно получить достаточно достоверную картину изменения интенсивности свечения газа. Негатив или позитив таких фотоснимков с помощью денситометра преобразовывался в цифровые значения, которые пересчитывались в значения относительной или даже абсолютной газовой плотности. Примеры результатов исследований, полученных таким способом, описаны в литературе [2, 3]. К сожалению, опыт таких измерений, а также использованные технические устройства для получения фотоизображений струй спустя десятиле-

тия устарели, публикаций по вопросам техники и методики измерений не обнаружено.

В настоящей работе предложено применить разработанный в отделе прикладной физики НГУ и основанный на электронно-пучковом возбуждении струи метод визуализации сверхзвуковых газовых струй, истекающих из сверхзвуковых сопел в разреженное пространство, для получения изображений с помощью сканера с использованием современной цифровой техники.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Эксперименты проводились на газодинамическом стенде ЛЭМПУС-2 Новосибирского государственного университета [4]. Система вакуумирования стенда обеспечивала высокое разрежение (до 0.2 Па) в камере расширения в режиме непрерывного истечения газа из сверхзвукового сопла при расходах до 0.2 г/с. Свечение сверхзвуковой струи возбуждалось высоковольтным (порядка 10 кэВ) электронным пучком диаметром 1 мм, перпендикулярно пересекающим поток на контролируемом расстоянии от газового источника. Схема экспериментов приведена на рис. 1.

Датчик изображения портативного ручного сканера с отключенной системой освещения устанавливался параллельно электронному пучку на подставку координатного устройства снаружи камеры расширения за фокусирующей линзой. Координатное устройство, на котором была установлена конструкция, обеспечивало перемещение и повороты сканера при юстировках. Область струи, свечение которой возбуждалось узким пучком первичных электронов, посредством линзы фокусировалась на линейку контактных датчиков изображения сканера. При оптимальной юстировке оптической системы ось линейки датчиков ориентировалась параллельно оси электронного пучка, а изображение последнего совмещалось с плоскостью поверхности линейки датчиков сканера. Линейка микролинз оптической системы сканера позволяла вырезать вдоль исследуемого светящегося газового потока узкую центральную часть, ширина которой с учетом увеличения фокусирующей линзы не превышала 0.15–0.2 мм.

Малая ширина изображения одного такта сканирования обеспечивала малый размер области регистрации  $\Delta X$  вдоль оси газового потока. Размер регистрируемой области вдоль луча зрения (ось Y) определялся только фокусировкой электронного пучка и глубиной резкости используемой оптической системы и не мог быть дополнительно локализован. Поэтому ограничение поперечного размера видимой области светящегося газового столба определялось диаметром электронного пучка. Разрешение системы вдоль оси Z (вдоль оси электронного луча) определялось из

соотношения видимых размеров изображения газового потока в плоскости сканера и расстояния между центрами ячеек датчика сканера (0.04 мм) и составило  $<0.1-0.15$  мм с учетом коэффициента увеличения оптической системы (0.45).

Фотография конструкции оптической системы установки с установленным сканером приведена на рис. 2. За основу сканирующего устройства взята оптическая линейка сканера iScan Wireless HD Portable Hand Held Mini Scanner Great с разрешением до 900 dpi при скорости сканирования, не превышающей 25 мм/с.

Изображение продольного или поперечного сечения стационарной газовой струи, истекающей из форкамеры газового источника с постоянным давлением  $P_0$ , формировалось при продольном (вдоль оси  $X$ ) или поперечном (вдоль оси  $Y$ ) перемещении источника. Газовый источник перемещался с постоянной скоростью относительно неподвижных электронного пучка и сканера. Электрические сигналы, пропорциональные яркости свечения возбужденных первичными электронами частиц газовой струи, считывались и регистрировались с линейки фотоприемников сканера по сигналам двух тактовых генераторов и формировали двумерную матрицу яркости изображения газового потока продольного  $I(x, z)$  или поперечного  $I(y, z)$  сечения. Матрица яркости изображения записывалась в карту памяти в формате jpg.

Скорость перемещения газового источника в процессе записи изображения не превышала десятой доли скорости, необходимой для считывания столбца матрицы яркости с линейки сканера, что позволяло получить практически не искаженное движением соплового источника распределение яркости электронного пучка. Перемещение соплового блока и сканирование сечений газового потока при создании изображения синхронизировались.

Изображения сечений струи в пикселях из-за различия скорости перемещения сопла и скорости формирования матрицы яркости изображения вытянуты вдоль оси перемещения. Для восстановления геометрических пропорций изображения подвергались преобразованию вдоль оси перемещения. Коэффициент преобразования определялся в процессе юстировки системы сканированием шаблона с известными поперечными размерами либо рассчитывался с использованием размеров линейки сканера, ее оптического изображения и известного коэффициента увеличения оптической системы.

С помощью программ обработки и построения распределений численной плотности по полученным изображениям определялись продольные и поперечные профили распределения плотности газа.



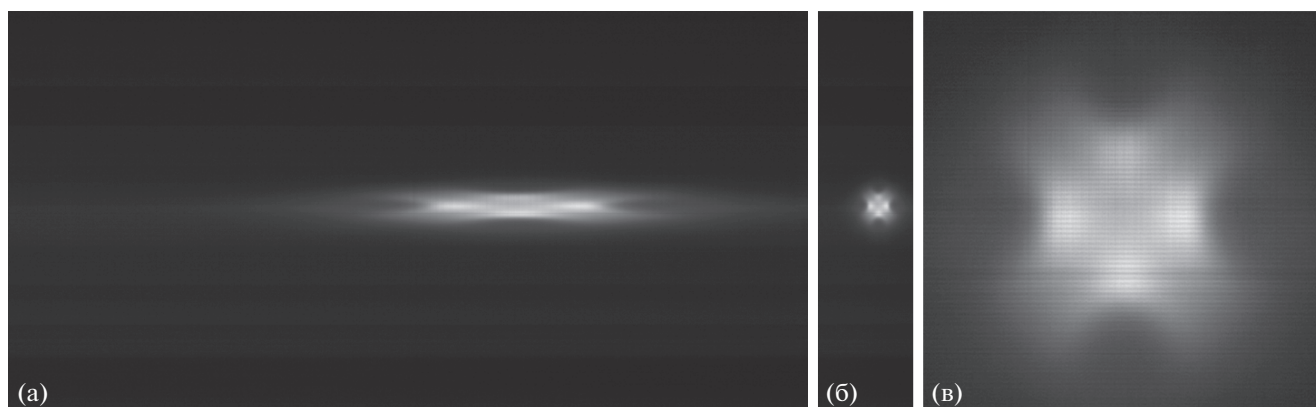
Рис. 2. Фотография оптической системы регистрации сверхзвуковых течений при помощи сканера. 1 – оптическая линза, 2 – юстировочный столик, 3 – сканер, 4 – футляр для сканера с диафрагмой, коллимирующей излучение.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

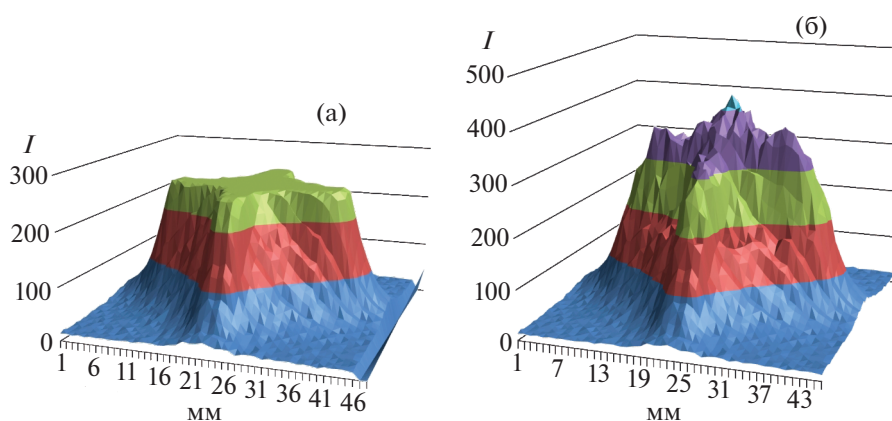
Рассмотрим процесс регистрации и получаемый результат на примере поперечного сечения сверхзвукового течения газа, истекающего через сборку в виде квадрата из восьми попарно сгруппированных одинаковых сопел, на расстоянии 62 мм от плоскости выходного среза сопел сборки. Двумерный массив распределения, регистрируемый сканером в виде распределения яркостей пикселей, представляет собой вытянутое изображение (рис. 3а) из-за различия в скоростях съема информации сканирующим устройством и перемещения газового объекта внутри вакуумной камеры. При обработке изображение трансформировалось в реальные пропорции. В итоге получались двумерные массивы данных, характеризующие распределения яркости свечения в плоскости сечений с геометрией, восстановленной с точностью до 1 мм (рис. 3б). Далее, при необходимости, осуществлялась обрезка областей вне сверхзвуковых потоков (рис. 3в).

Динамический диапазон прибора iScan по измеряемой яркости пикселей составлял 255 единиц. Поэтому, если при измерениях рост яркости пикселей превышал 2.5 порядка, на изображениях появлялись участки “засветки”, на которых интенсивность свечения превышала предельно допустимую.

Для расширения диапазона регистрируемых плотностей применялись поглощающие ней-



**Рис. 3.** Пример изображения поперечного сечения сверхзвуковой струи  $\text{CO}_2$  за сборкой из восьми сопел: **а** – до обработки; **б** – после преобразований свертки к реальным пропорциям; **в** – итоговое изображение. Давление торможения  $P_0 = 60$  кПа; давление фона  $P_h = 0.7$  Па.



**Рис. 4.** Картина распределения яркостей регистрируемого излучения, получаемая при использовании сканера (**а**), а также сканера и светофильтра (**б**).

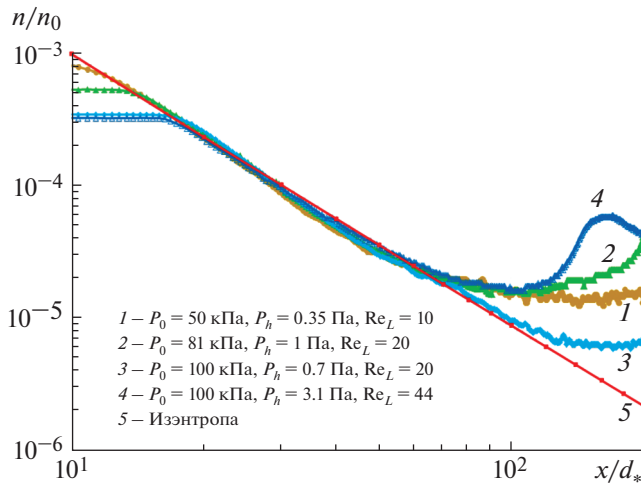
тральные широкополосные светофильтры ND0,6, ND0,9 компании KnightX с коэффициентами ослабления соответственно в 4 и 8 раз.

Изображения распределения яркости потока оцифровывались разработанной программой на C# с использованием Windows forms, позволяющей получать из изображений одномерные и двумерные массивы яркости пикселей. Одномерные массивы записывались алгоритмом Брезенхема, поскольку в ходе работ могла возникнуть потребность получения неортогональных профилей. Двумерные изображения ввиду осесимметричности течений сохранялись в виде квадратного массива данных.

Итоговые картины распределения яркостей от излучения возбужденных частиц газа сверхзвуковых течений строились путем сличения и интегрирования кадров, полученных со светофильтрами и без них. Сравнение зависимостей регистрируемой яркости  $I$  в поперечном сечении сверхзвуковой газовой струи от координат  $X$ ,  $Y$ , полученных при

помощи сканера в двух вариантах измерений, показанных на рис. 3, приведено на рис. 4: без фильтра – на рис. 4а, с ослабляющим фильтром ND0,9 – на рис. 4б.

Плотность газа в сверхзвуковом потоке определялась исходя из линейной зависимости интенсивности излучения (яркости) от плотности газа и силы тока электронного луча [5]. Для соответствия этому условию использовалась процедура отбора определенного участка спектра [5, 6]. Для вычисления плотности газа ( $n$ ,  $\text{м}^{-3}$ ) значения яркости пикселей нормировались на ток коллектора электронов. Ток менялся незначительно, однако его учет позволил дополнительно снизить погрешность измерений. Измерения плотности газа в струе калибровались по плотности фонового газа в камере расширения вне струи вблизи газового источника. Давление  $P_h$  фонового газа измерялось емкостным вакуумметром CDG-500 Agilent. Величина яркости пикселей  $I_h$ , соответ-



**Рис. 5.** Измеренное с помощью сканера распределение плотности сверхзвуковой струи  $N_2$  вдоль оси  $X$  в зависимости от давления торможения  $P_0$  и давления в окружающем фоновом газе  $P_h$ . Сплошная линия — изэнтропическая зависимость плотности на оси струи.

ствующая давлению  $P_h$ , усреднялась по измерениям в нескольких точках. По формуле

$$n = \frac{P_h}{kT_h} I$$

рассчитывались абсолютные значения плотности  $n$ ,  $m^{-3}$ . Здесь  $k$ , Дж/К — постоянная Больцмана,  $T_h$ , К — температура в камере расширения,  $I$  — значение регистрируемой яркости пикселей в точке измерения.

Проверка методики получения количественных данных плотности и оценка погрешности осуществлялись в сверхзвуковой струе  $N_2$ , истекающей из звукового сопла с диаметром  $d_* = 0.5$  мм. Результаты приведены на рис. 5. В отсутствие конденсации в потоке измеренная плотность газа на оси сверхзвуковой струи на различных расстояниях от среза сопла, нормированная на плотность в форкамере сопла,  $n/n_0$  в зависимости от безразмерного расстояния от сопла  $x/d_*$  должна совпадать с изэнтропическим законом [7].

Как следует из приведенных зависимостей, расхождение с изэнтропой [7] в интервале расстояний  $15 < x/d_* < 60$  незначительно. На малых расстояниях от сопла,  $x/d_* < 20$ , в струе азота при более высоком давлении имеется область “засветки”, обусловленная превышением предела линейности фотоприемников сканера. С ростом  $P_0$  плотность газа на фиксированном расстоянии от сопла возрастает, поэтому область “засветки” наблюдается на большем расстоянии. В дальнем поле течения,  $x/d_* > 70$ , обнаруживается влияние проникаю-

щего газа, обусловленное размытием боковых ударных волн и замыкающего диска Маха ( $Re_L < 100$ ). При  $Re_L = 14.5$  превышение над изэнтропической зависимостью из-за проникающего в струю фонового газа обнаруживается на расстоянии, более близком к соплу, чем в остальных режимах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Точность восстановления геометрии течений описанным методом составляет 1 мм. Данный предел точности связан с опосредованной связью между моментами запуска и остановки координатного устройства перемещения соплового блока со струей, а также включением и выключением записывающего блока системы регистрации сканера. Разброс значений яркости, обусловленный разницей чувствительности фотоприемников сканера, лежит в пределах 2%. Основной вклад в погрешность абсолютных измерений плотности газового потока, по результатам измерения с помощью линейки фотодиодов сканера, вносит нелинейная чувствительность прибора при низких уровнях сигналов, по которым происходит тарировка. Погрешность определения уровня фонового сигнала не превышает 12%. Поэтому общая погрешность определения локальной плотности в зависимости от расстояния до сопла, как показывают результаты сравнения с изэнтропической зависимостью (см. рис. 5), в диапазоне, в котором отсутствуют влияние проникновения фонового газа на ось сверхзвуковой струи и “зашкал” измерительной системы, не превышает  $\pm 15\%$ .

При использовании сканера для абсолютных измерений необходимо учитывать ограничения в применении методики. На близких к соплу расстояниях следует применять светофильтры для ослабления светового сигнала. В то же время на больших расстояниях оказывается недостаточно интенсивности излучения для сканера, что приводит к неточности получаемых данных. Однако, несмотря на погрешность в измерениях сканером, данная методика обладает существенным преимуществом по сравнению со спектрометром — возможностью экспресс-измерений двумерных полей плотности. Значительного прогресса в точности измерений плотности струи можно ожидать при переходе к использованию специальных измерительных сканеров с большим диапазоном чувствительности.

В целом полученный результат показывает широкие возможности использования разработанной сканирующей системы как для относительных, так и для абсолютных измерений плотности в сверхзвуковых струях, в том числе со сложной конфигурацией потоков.

## БЛАГОДАРНОСТИ

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

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов Министерства образования и науки РФ 3.5918.2017/ИТР и 3.5920.2017/ИТР.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Belan M., De Ponte S., Tordella D.* // Experiments in Fluids. 2008. V. 45. № 3. P. 501. <https://doi.org/10.1007/s00348-008-0493-5>
2. *Кисляков Н.И., Ребров А.К., Шарафутдинов Р.Г.* // ПМТФ. 1975. Т. 16 № 2. С. 42.
3. *Герасимов Ю.И., Ярыгин В.Н., Крылов В.Н., Сагдуллин Б.А.* // Теплофизика и аэромеханика. 2009. Т. 16. № 3. С. 395.
4. *Zarvin A.E., Kalyada V.V., Madirbaev V.Zh., Korobeishchikov N.G., Khodakov M.D., Yaskin A.S., Khudozhnikov V.E., Gimelshein S.F.* // IEEE Transactions on Plasma Science. 2017. V. 45. Issue 5. P. 819. doi 10.1109/TPS.2017.2682901
5. *Бочкарев А.А., Косинов В.А., Ребров А.К., Шарафутдинов Р.Г.* // В сб. Экспериментальные методы в динамике разреженных газов / Под ред. чл.-кор. АН СССР С.С. Кутателадзе. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 1974. С. 98.
6. *Smith J.A., Driscoll J.F.* // J. Fluid Mech. 1975. V. 12. № 4. P. 695.
7. *Ashkenas H., Sherman F.S.* Rarefied Gas Dynamics IV / Ed. by J.H. de Leeuw. NY.: Academic Press, 1966. P. 84–105.