

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЕРХЗВУКОВЫХ ЗАКРУЧЕННЫХ СТРУЙ МЕТОДОМ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА “PC-Look”

Анисимов П.А., Глумов Н.Н., Рыжков В.В., Сергеев В.В.
Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Сверхзвуковые газовые струи представляют собой обширный и практически важный класс течений.

Интерес, проявляемый к сверхзвуковым струям, объясняется их значением в самых разных областях науки и техники (химической технологии, машиностроении, авиации, ракетной и лазерной технике, а также ряде других). Изучению струй, истекающих из сопла в затопленное пространство на нерасчетных режимах, посвящено значительное количество работ. Однако большинство из них касается незакрученных струй с высокими степенями нерасчетности, числами Маха и Рейнольдса. Определенный интерес представляют экспериментальные исследования закрученных сверхзвуковых струй в связи с их слабой изученностью в областях малых чисел M и Re и некоторыми направлениями прикладного характера.

Новые научные результаты в газодинамике могут быть получены при условии либо применения принципиально новых методов и средств измерений, либо существенного расширения возможностей, известных и широко используемых в настоящее время, за счет увеличения, в частности, их информативности, путем привлечения автоматизированных комплексов.

В работе реализован метод голографической интерферометрии и для целей повышения информативности эксперимента используется программно-аппаратный комплекс обработки интерферометрических изображений “PC-Look” разработки Самарского государственного аэрокосмического университета [1]. Комплекс предназначен для телевизионного ввода, обработки, визуализации и документирования интерферометрической информации при исследовании фазовых объектов.

Технические средства комплекса включают в себя следующие компоненты: персональную ЭВМ с НМД не менее 40 Мб и монитором

VGA; устройство телевизионного ввода и визуализации полутоновых изображений размером 256x256 отсчетов поля яркости на экране, созданное в конструктиве ПЭВМ, с функциями

- ввода изображения за один кадр телевизионной развертки;
- запоминания изображения в собственной памяти модуля;
- двустороннего обмена информацией между памятью модуля и ПЭВМ;

формирования стандартного видеосигнала для отображения хранимой в модуле информации на экране телевизионного монитора; телевизионную камеру, формирующую стандартный черно-белый видеосигнал; телевизионное видеоконтрольное устройство.

Прикладное программное обеспечение обработки изображений создано в среде Turbo C++ и включает в себя: систему управления базой данных изображений в виде библиотеки функций; базовый пакет прикладных задач, обеспечивающий выполнение типовых операций при работе с изображениями :

- синтеза тестовых изображений;
- поэлементных преобразований изображений;
- локальной пространственной обработки изображений;
- статистического анализа изображений;
- копирования изображений;
- работы с фрагментами изображений;
- масштабирования изображений;
- вывода информации;
- скалярных и вспомогательных операций;

программную оболочку с иерархическим меню функций, редактором и средствами визуализации изображений на экране монитора ПЭВМ.

Базовое программное обеспечение расширено под задачи обработки интерферограмм до процедур :

- выделения линий экстремумов на интерферометрическом изображении;
- измерения отклонений линии от нормального положения;
- протоколирования результатов обработки с приведением данных к физическим единицам измерений.

Собственно обработка интерференционной картины заключается в определении разности $n(x,y,z)$ - n_0 при решении уравнения [2]:

$$\Delta\Phi(x,y) = \int [n(x,y,z) - n_0] dz, \quad (1)$$

где n_0 - показатель преломления невозмущенной области.

Оптическая разность хода может быть определена :

$$\Delta\Phi(x,y) = \Delta N(x,y) \lambda, \quad (2)$$

где ΔN - разность номеров полос, находящихся в данной точке при наличии возмущения и при отсутствии его.

Для осесимметричного течения искомая функция определяется из интегрального уравнения Абеля:

$$\lambda \cdot \Delta N(y) = 2 \int_y^R \frac{f(r) r dr}{(r^2 - y^2)^{1/2}}, \quad (3)$$

где $f(r) = n(r) - n_0$; x, y, z -координаты; z - направление распространения луча.

В результате инверсии имеем:

$$f(r) = \frac{\lambda}{\pi} \int_r^R \frac{(d \cdot \Delta N / dy) dy}{(y^2 - r^2)^{1/2}}. \quad (4)$$

Показатель преломления и плотность газового потока связаны уравнением Гладстона-Дейла:

$$k \rho = n - 1, \quad (5)$$

где k - постоянная Гладстона-Дейла (константа для индивидуального газа).

Так как для осесимметричных фазовых объектов функция распределения номеров полос определяется по интерферограмме в виде дискретного набора данных, то (3) или (4) решаются численно.

Точность решения зависит от ряда факторов: от числа зон разбиения осесимметричного объекта, вида аппроксимации подинтегральной функции в зоне, от вида функции в зоне, от вида функции распределения номеров полос, от погрешности съема данных и ее распределения по радиусу.

Суть численного интегрирования заключается в следующем: объект разбивается на конечное число зон, в каждой зоне показатель преломления аппроксимируется по определенному закону, затем осуществляется суммирование в направлении распространения луча.

Существует целый ряд методов анализа интерферограмм осесимметричных фазовых объектов. Все они используют численное решение (3) или (4) в виде системы алгебраических уравнений, решаемых совместно:

$$D n_i = l \cdot \sum_{j=1}^m C_{j,i} N_j. \quad (6)$$

В работе область существования функции разбивается на 20 зон равной ширины, в каждой из которых она описывается интерполяционным многочленом третьей степени. Интегралы в зонах могут быть при этом взяты аналитически, что позволяет составить таблицу коэффициентов унифицированной схемы расчета [3]. В расчетах проводится сглаживание исходных данных путем замены каждого снятого с интерферограммы значения средним, найденным способом наименьших квадратов по шести соседним, относительно экспериментального значения.

Изложенный алгоритм обработки был реализован в виде подпрограмм и дополнил базовое программное обеспечение обработки интерферограмм.

В работе демонстрируются некоторые возможности, реализованные при обработке интерферограмм сверхзвуковой закрученной газовой струи с помощью программно-аппаратного комплекса "PC-Look". Так на рис 1 и 2 представлены исходное и бинарное изображения интерферограммы. Подобные изображения могут быть визуализированы на различных промежуточных стадиях обработки: фильтрации, устранения помех, выделения контраста, масштабирования изображения и т.д.

В графическом виде распределение плотности в поле течения газовой сверхзвуковой струи в поперечном направлении в различных сечениях показано на рис.3. На рис.3 вдоль оси ординат отложена безразмерная координата, а вдоль оси абсцисс- значения плотности. Перебрав последовательно сечения вдоль и поперек оси струи, удобно выделить характерные сечения, отражающие особенности распределения плотности, и выявить интересующие исследователя особенности, представить ударно-волновую структуру и т.д. По графикам (рис.4) можно установить, например, положение висячего скачка уплотнения (характерный перегиб кривой распределения плотности), можно оценить неравномерность газодинамических параметров в приосевой области, а также степень расширения газа в пределах первой бочки сверхзвуковой струи.

На рис.5 показан фрагмент выходного протокола данных значений плотности в исследованном поле течения по физическим координатам, в форме удобной для восприятия и анализа данных.

Поле плотности в табличном виде (рис.5) и поле плотности, визуализированное на экране монитора ПЭВМ или на бумажном носителе (рис.6), существенно дополняют представление о распре-

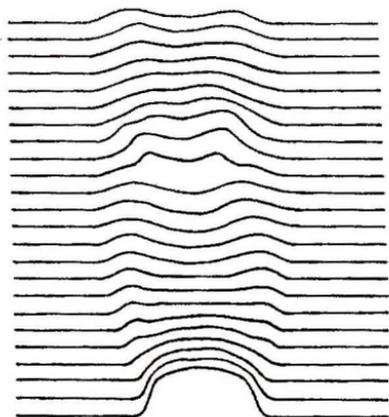


Рис.1. Исходное изображение интерферограммы сверхзвуковой газовой струи

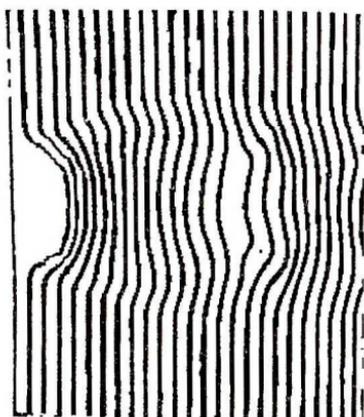


Рис .2 . Обработанное бинарное изображение

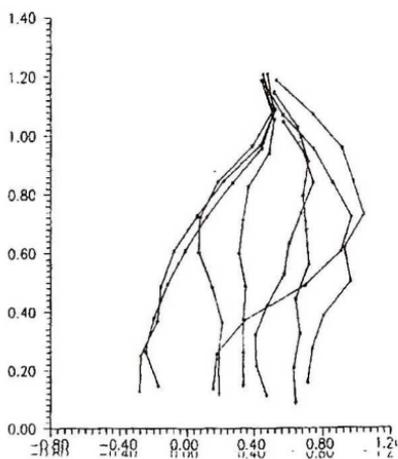


Рис 3. Графики распределения плотности в поперечном к оси струи направлении

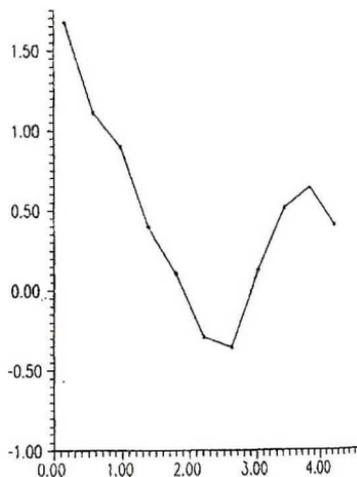


Рис. 4. График распределения плотности вдоль оси струи

Y	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.0000	4897	4822	7182	6860	8193	4222	3161	2571	2060	1063
2.0000	4821	4522	7371	6532	6487	4900	4102	3731	3101	2256
3.0000	5452	7181	7891	7342	7691	6332	6781	6161	5391	3411
4.0000	5061	6711	7831	6891	6022	7242	6731	6211	6151	6051
5.0000	4162	6311	7131	7391	6722	6884	6221	6371	7911	6471
6.0000	5361	7481	8831	8532	6721	6860	6961	7331	6161	6891
7.0000	5831	6322	1912	2892	2422	6855	7431	4501	3441	3181
8.0000	6371	7922	6462	1992	3062	1161	6352	4411	1791	1151
9.0000	5871	6781	6861	6162	7541	6381	6231	6381	2631	1051
10.0000	4761	6761	6141	4622	3721	1952	6701	2782	4091	4761
11.0000	4721	1481	6721	3992	2481	6162	2641	4301	4661	3441
12.0000	4661	6451	5122	3781	1642	1812	2871	4301	4641	6831
13.0000	4661	6321	4831	2642	1562	6432	1462	2161	2181	2291
14.0000	4862	6801	6201	3192	1971	6612	6822	1662	2471	3911
15.0000	4842	5351	4581	2432	1621	6961	6861	1161	1491	6201
16.0000	4671	5151	4541	2082	2651	2931	1851	1801	1251	6731
17.0000	4641	5281	4901	3522	2261	3392	3161	3301	3681	4591
18.0000	4691	3691	6501	4832	6131	6401	6871	6201	6151	6921
19.0000	4741	3021	6111	6201	7532	6301	6561	6811	9001	6932
20.0000	6741	6901	6371	6942	6022	6032	11672	6441	6011	6882
21.0000	6802	1022	1152	2532	3622	4192	2072	3292	1642	1272
22.0000	6832	5232	6412	6712	6922	6782	6922	6342	3722	3392
23.0000	6232	4382	7822	1902	6012	6032	6172	7462	6212	6922

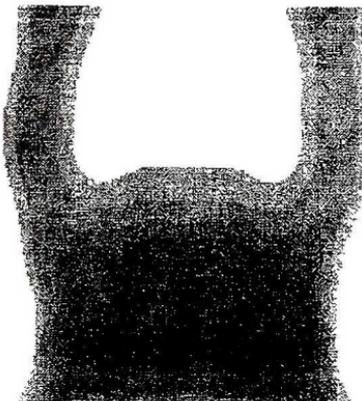


Рис. 5. Протокол поля плотности

Рис.6. Поле плотности сверхзвуковой газовой струи начальный участок

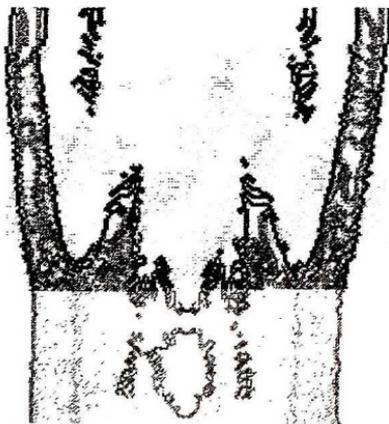
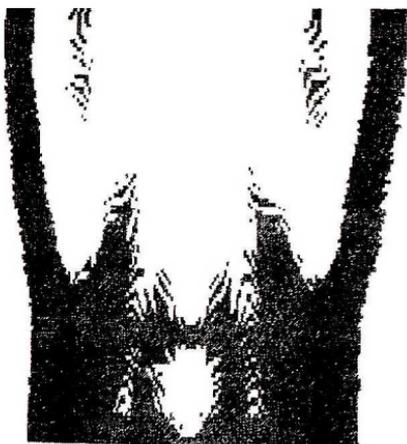


Рис. 7. Поле первой производной плотности сверхзвуковой газовой струи

Рис.8. Поле второй производной плотности сверхзвуковой газовой струи

делении газодинамических параметров. В пределах одной яркостной зоны плотность меняется в узких заданных пределах. На таких картинах наглядно представлены области высоких и низких параметров, характерные неравномерности в поперечных и продольных направлениях, выделены зоны сверхзвуковых и дозвуковых течений, скачков уплотнения и т.д. Наиболее удобны такие данные для качественного анализа течений и проведения сравнительных и параметрических исследований.

На рис.7 и 8 реализованы поля производных газодинамических параметров, которые смогут заменить теневые и прямотеневые картины. Картины полей производных удобно рассматривать при изучении ударно-волновой структуры сверхзвуковых струй, причем первая из них (рис.7), как правило, используется при четко выраженной структуре, а вторая при более тонких исследованиях в областях, где структура течения менее определена.

Таким образом, в работе показаны новые возможности исследования течений интерферометрическим методом, которые связаны, в основном, с увеличением объема информации за счет использования ЭВМ относительно простого доступа к массивам данных, расширением сервисного обслуживания исследователя, облегчающего восприятие экспериментальных результатов, и представлением качественных картин течений.

Список литературы

1. Программная система обработки изображений "PC-Look": Отчет о НИР/НПП "Компьютерные технологии" -Самара,1991.-105с.
- 2.Островский Ю.И., Бутусов М.М., Островская Г.В. Голографическая интерферометрия.-М.:Наука,1977г.
- 3.Ларькина Л.Т. К расчету радиального распределения излучательной способности. В сборнике: Применение плазмотрона в спектроскопии.- Фрунзе: ИЛИМ,1970г.
- 4.Нигодюк В.Е., Рыжков В.В., Чепрасов Н.Н. Диагностика сверхзвуковых недорасширенных струй газа методом голографической интерферометрии. В кн.: Лазерные средства измерений и их перспективы применения в ГА.- Киев: КИИГА,1985г.