

*Двенадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 25 — 28 июня 2013 г.*

УДК 53.087.5+534.122

А.П. Петров

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича, СО РАН,
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1, E-mail: admin@itam.nsc.ru*

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДИНАМИКИ ВОЛНОВОЙ КАРТИНЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ С ПРЕГРАДОЙ

АННОТАЦИЯ

В статье приводятся результаты экспериментов по визуализации теньевыми методами картины взаимодействия с плоской преградой сверхзвуковой струи, выходящей из осесимметричного сопла.

СВЕРХЗВУКОВАЯ СТРУЯ, ПРЕГРАДА, ВОЛНОВАЯ СТРУКТУРА

ВВЕДЕНИЕ

В исследованиях струйных и других нестационарных течений газа достигнуты значительные успехи, которые представлены в коллективной монографии [1], отражающей важнейшие результаты теории и эксперимента в этой области. Особый интерес вызывают режимы, связанные с возникновением автоколебаний сверхзвуковых струй, истекающих в свободное пространство и встречающих преграду. При натекании сверхзвуковой недорасширенной струи на преграду формируется сложная газодинамическая картина взаимодействия, обусловленная наличием в струе ударных волн различной интенсивности, волн разрежения, тангенциальных разрывов, областей дозвукового и сверхзвукового течения. Взаимодействие сильно усложняется, когда в струе развиваются автоколебания, и визуализация физической картины с помощью оптических методов является важным этапом в исследовании для понимания механизма поддержания автоколебаний и разработки математических моделей, описывающих такой процесс.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Регистрации волновой структуры при натекании сверхзвуковой струи проводилась на струйной установке, состоящей из воздуховода с регулирующей задвижкой, ресивера, сверхзвукового сопла и подвижной плоской преграды, установленной на оси струи. Визуализация осуществлялась с помощью теневой установки, собранной из двух аэрофотообъективов Уран-16 и работающей в параллельных лучах [2]. В качестве источника света использовалась ртутная лампа НВО-500 для кадровой и непрерывной регистрации исследуемого процесса. Получение мгновенных теневого и прямотеневого снимков осуществлялось с использованием искрового источника, изготовленного по безиндуктивной схеме [3]. Длительность вспышки источника примерно 10^{-6} сек.

На первом этапе визуализировалась свободная струя, выходящая из сверхзвукового сопла. На различных режимах работы установки определялись ее параметры: положение диска Маха $\bar{l}_M = \frac{l_M}{d_a}$, границы струи, длина первой бочки $\bar{l}_\delta = \frac{l_\delta}{d_a}$ и т.д. Здесь l_M – расстояние от среза сопла до диска Маха, l_δ – расстояние от среза сопла до конца первой бочки, d_a – диаметр выходного сечения сопла. Затем устанавливалась плоская преграда нормально к струе и, меняя ее положение от сопла, и степень нерасчетности истечения n находился диапазон возникновения автоколебаний.

На рис.1 показан типичный снимок свободной струи выполненный прямотеневым методом и приведена таблица положений границы первой бочки и диска Маха при различных $n = P_a/P_n$, где P_a - давление газа на срезе сопла, а P_n – давление газа в окружающем пространстве.

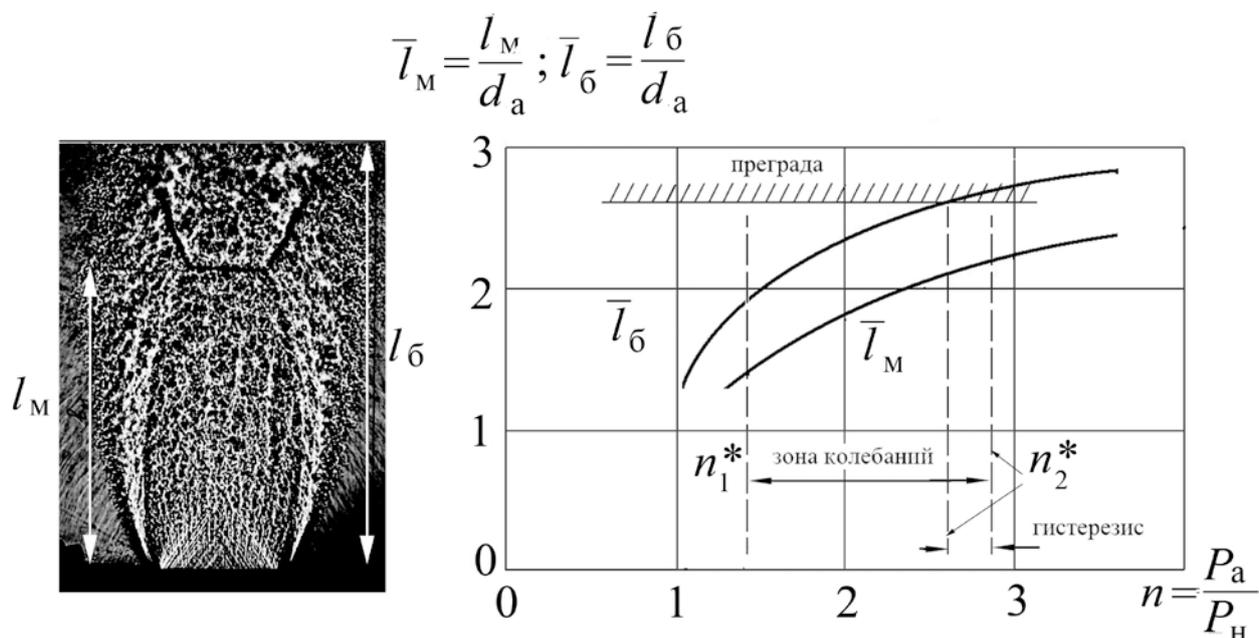


Рис. 1. Изменение расстояния от среза сопла до диска Маха и конца первой бочки в зависимости от $n = P_a/P_n$.

На графике показано положение преграды относительно среза сопла и отмечены границы значений степени нерасчетности n_1^* и n_2^* между которыми возникают автоколебания. Правая граница обладает гистерезисом – зона автоколебания больше при увеличении n и меньше при уменьшении. Положение преграды было выбрано таким образом, чтобы диск Маха для свободной струи при задаваемых степенях нерасчетности находился перед плоскостью преграды, а граница первой бочки струи на некоторых режимах пересекала эту плоскость.

Чтобы зарегистрировать динамику процесса изображение теневой картины проектировалось на плоскость входной щели фоторегистра ФР-11. Положение щели на изображении совпадало с направлением оси струи. Нож в теневой установке располагался перпендикулярно, чтобы визуализировались градиенты вдоль оси. Типичные регистрограммы теневой картины, показывающие изменение градиента плотности вдоль оси струи для трех значений n , приведены на рис.2. Рядом с регистрограммами дано соответствующее схематическое изображение волновой структуры. В режиме автоколебаний регистрируется стабильный периодический режим, при котором происходят колебания скачков системы в области между соплом и преградой, а мгновенные прямотеневые снимки а

и б показывают различную волновую картину течения в различные моменты времени. По регистрограмме определялись частота и размах колебаний диска Маха вдоль оси струи в зависимости от n .

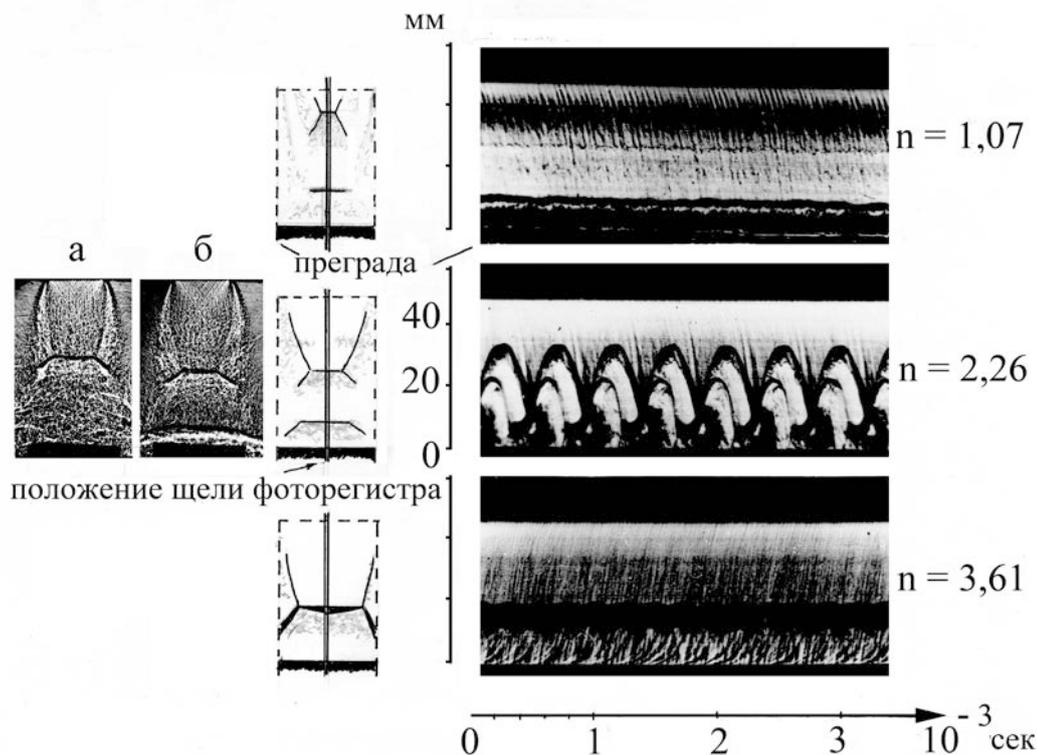


Рис. 2. Регистрограммы теневой картины около преграды в сечении вдоль оси струи.

Такая регулярность позволяет снять теневую картину в режиме скоростной съемки только для одного периода. С этой целью был использован скоростной фоторегистор СФР-2, который был согласован с теневой установкой. На рис.3 показана серия снимков, снятая со скоростью $6 \cdot 10^4$ к / сек. при $n=2,7$. Опишем развитие колебаний с момента, когда диск Маха находится на максимальном удалении от преграды (2)*. Диск Маха начинает двигаться к преграде. Его диаметр и стрелка прогиба уменьшается ($2 \div 14$). Уменьшается также размер сечения струи, обтекающей преграду. В результате этого на преграде происходит увеличение плотности газа и образуется волна сжатия ($3 \div 7$). На снимках увеличение оптической плотности соответствует областям, где градиент показателя преломления направлен к преграде. Волна сжатия преобразуется в скачок уплотнения (8), который начинает отходить от преграды навстречу диску Маха ($9 \div 14$). Диск Маха и скачок уплотнения от преграды совмещаются (15), после чего диск Маха начинает, а скачок продолжает движение от преграды, причем первый с большей скоростью. С этого момента в струе между диском Маха и преградой образуется несколько волн сжатия ($16 \div 21$). По мере удаления диска Маха от преграды размер сечения струи, обтекающей преграду, увеличивается, и плотность газа на преграде падает. Стрелка прогиба и диаметр диска Маха увеличивается ($21 \div 29$) и он достигает положения, максимально удаленного от преграды и цикл заканчивается. С момента, когда размер струи начинает увеличиваться (10), в области между отсоединенным сачком и преградой образуются ударные волны, которые распространяются в окружающей среде, со скоростью $350 \div 400$ м/сек. Эти волны, отражаясь от дна сопла, движутся по наружным областям струи по направлению потока в виде волн сжатия ($8 \div 17$).

*Здесь и в дальнейшем указаны номера кадров на рис.3

Смонтировав несколько циклов один за другим и закольцевав можно смотреть и изучать этот процесс в динамике более внимательно.

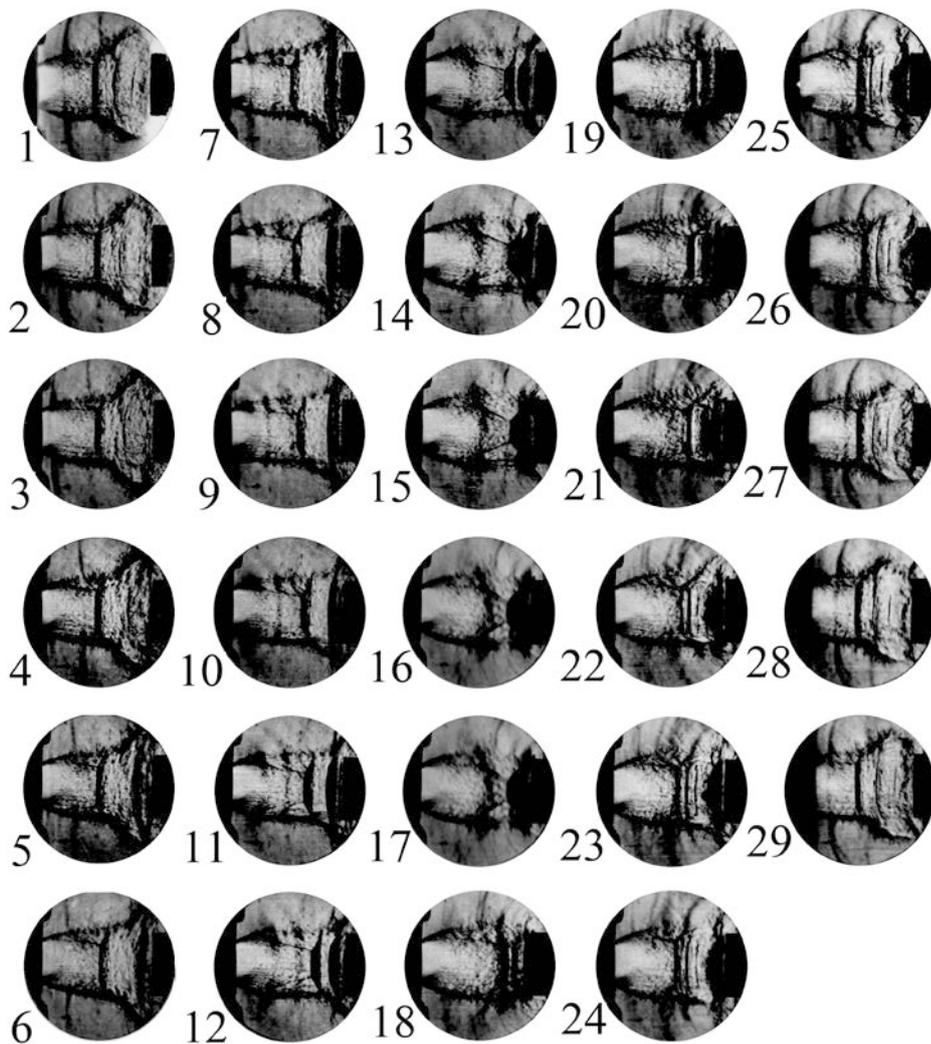


Рис. 3. Кинограмма одного цикла пульсационного режима.

Используя полученную кинограмму, можно построить регистрограмму. На каждый кадр накладывался трафарет, иммитирующий щель фоторегистра, вырезалась часть снимка вдоль оси струи и укладывалась на график последовательно друг за другом. На рис.4 приведена, получившаяся таким способом, регистрограмма. Она похожа на реальную.

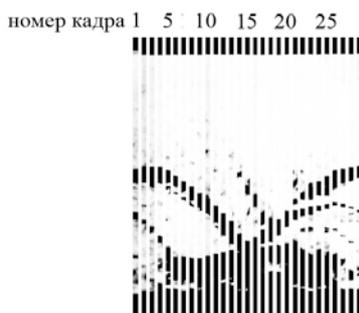


Рис. 4. Искусственная регистрограмма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе использование высокоскоростной съемки и непрерывной развертки теневой картины в выбранном сечении позволило визуализировать динамику колебаний скачков у преграды и показать в виде фильма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Глазнев В.Н. и др.**, Струйные и нестационарные течения в газовой динамике / Новосибирск: Издательство СО РАН, 2000г. - 200с.
2. **Васильев Л.А.**, Теневые методы. - М, 1968.
3. **Moden I.C.** Short-duration spark light source of extreme luminance. Proceedings of the 5th International Congress on Highspeed Photography. Washington, 1960.

A.P. Petrov

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Russia, 630090, Novosibirsk, Institute st.,4/1, E-mail: admin@itam.nsc.ru

VISUALIZATION OF THE DYNAMICS OF THE WAVE PATTERN OF INTERACTION OF SUPERSONIC JET OBSTACLE

The article presents the results of the experiments by visualizations of shadow paintings methods of interaction with a flat barrier supersonic jets emerging from axisymmetric nozzle.