

*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 теневых и прямотеневых 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,  $l_\delta$  – 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.

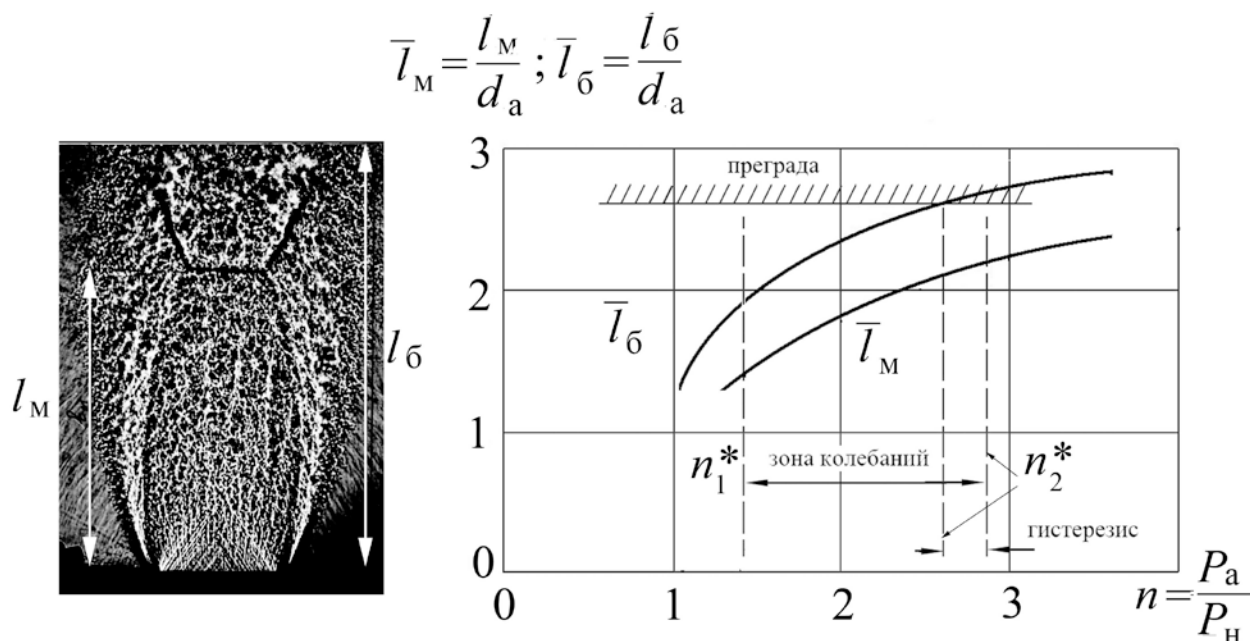


Рис. 1. Изменение расстояния от среза сопла до диска Маха и конца первой бочки в зависимости от  $n = P_a/P_n$ .

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  $n$ .

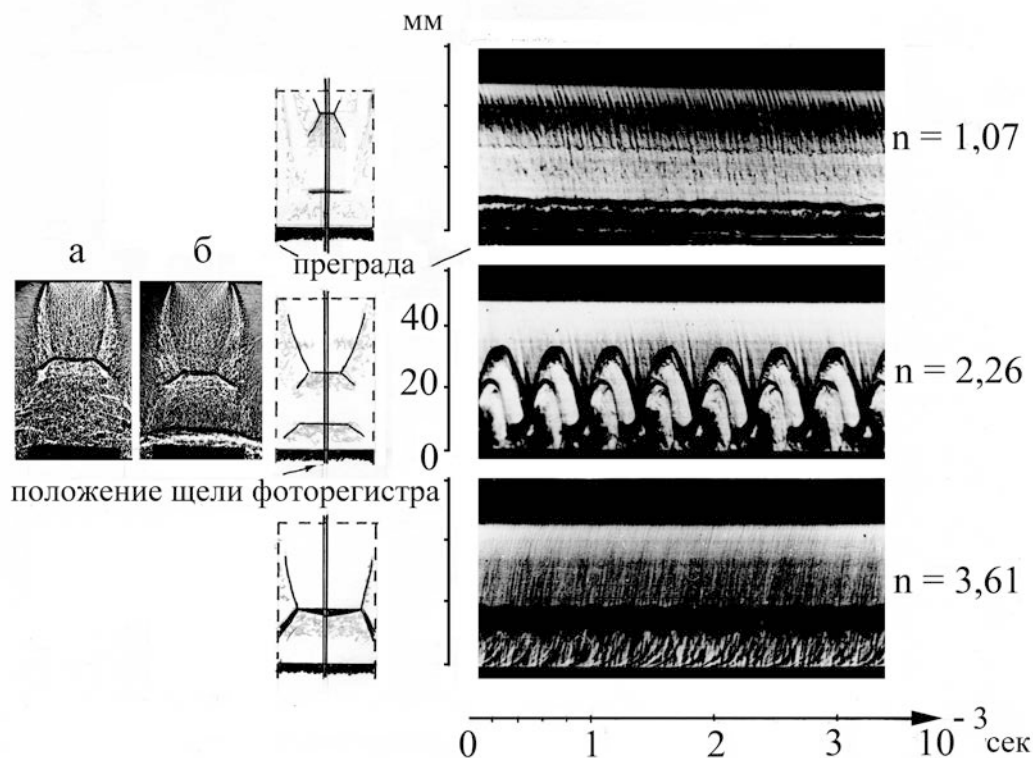


Рис. 2. Регистрограммы теневой картины около преграды в сечении вдоль оси струи.

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.

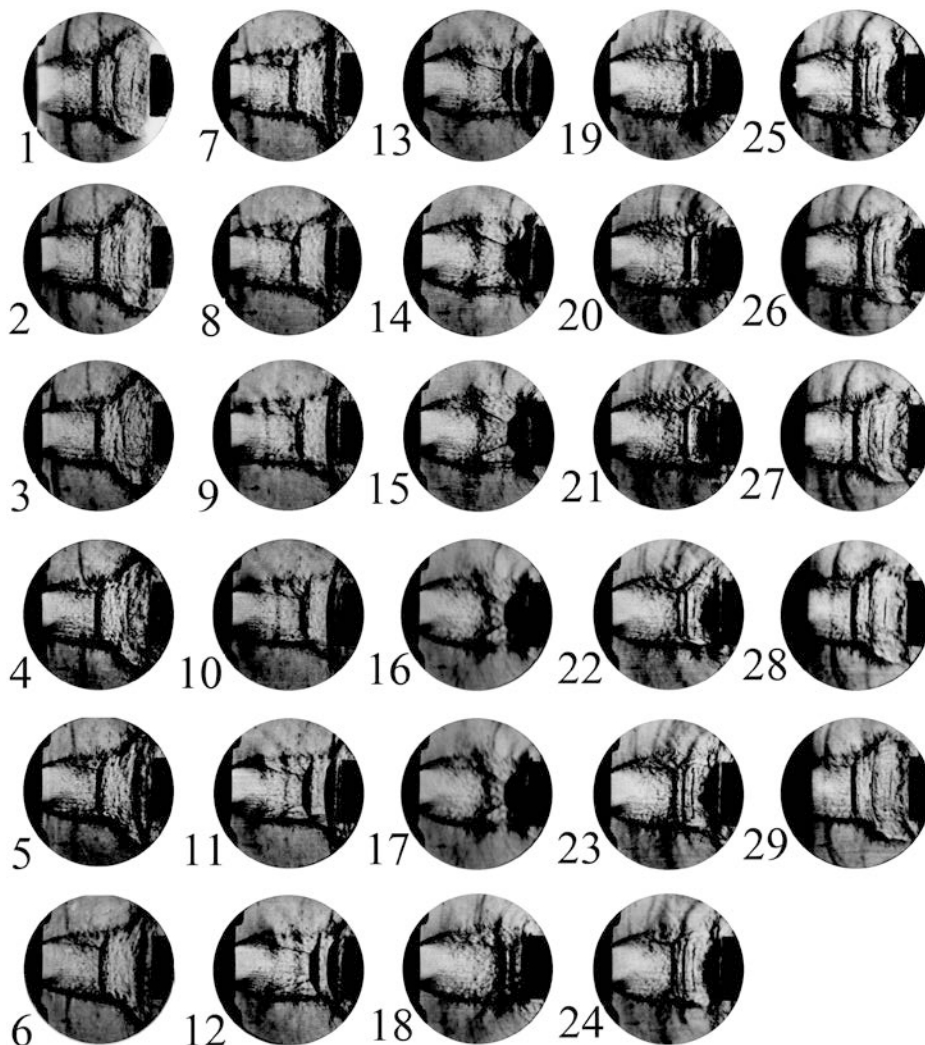


Рис. 3. Кинограмма одного цикла пульсационного режима.

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.

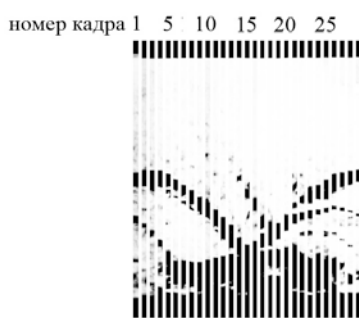


Рис. 4. Искусственная регистрограмма.

## **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 5<sup>th</sup> 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.*