

## ДВОЙНАЯ СПИРАЛЬНАЯ СВЕРХЗВУКОВАЯ СТРУЯ

**ХАСАНОВ Холмурад**

*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
механико-математический факультет, кафедра аэромеханики и газовой динамики,  
Москва, Россия*

[Khasanov6@gmail.com](mailto:Khasanov6@gmail.com)

В статье представлено ранее не наблюдавшееся явление формирования затопленной недорасширенной сверхзвуковой струи воздуха, истекающей по вектору земной гравитации, из сопла с центральным конусом, структуры из двух сужающихся конусовидных сплетённых спиралей. Дана методика управления подобной структурой струи путём выдвижения центрального конуса по направлению потока.

Специфические особенности структуры потока, возникающие при использовании кольцевых сопел и сопла Лаваля, исследованы во многих разделах газодинамики [1 – 3]. Для истечения газа из подобных сопел характерно прогрессирующее расширение потока и относительно быстрое рассеивание импульса струи. В литературе изучалась недорасширенная сверхзвуковая затопленная газовая струя, возникающая при истечении из таких сопел.

В представленных экспериментах исследовано истечение газа из сопла с центральным конусом. Установлено, что изменение положения центрального конуса и пространственной ориентации сопла позволяет регулировать развитие неустойчивости процесса истечения газа и дает возможность переходить от режима с маховской волной к режиму волновой завитой спирали, ранее не наблюдавшемуся. Возможность формирования такой струи может быть использована при решении ряда технических задач газодинамики, например, для минимизации потери импульса в струе, что позволит создавать струи с большой дальностью для получения затопленных недорасширенных сверхзвуковых струй без разрывов и др.

**1. Экспериментальная часть.** Исследование выполнено для недорасширенной сверхзвуковой затопленной струи, истекающей из сопла с центральным конусом (СЦК).

Изучены различные режимы истечения. На рис. 1 представлена схема авторской конструкции сопла с центральным конусом.

Особенность конструкции СЦК (рис.1) состоит в том, что остриё центрального конуса выступает за срез сопла, предусмотрена также возможность продольного перемещения центрального конуса [4, 5]. Влияние конфигурации сопла на характер течения исследовано в следующих диапазонах величин углов  $\alpha$  и  $\beta$ :  $7^\circ \leq \alpha \leq 85^\circ$ ;  $39^\circ \leq \beta \leq 132^\circ$ ;  $12^\circ \leq \beta - \alpha$ .

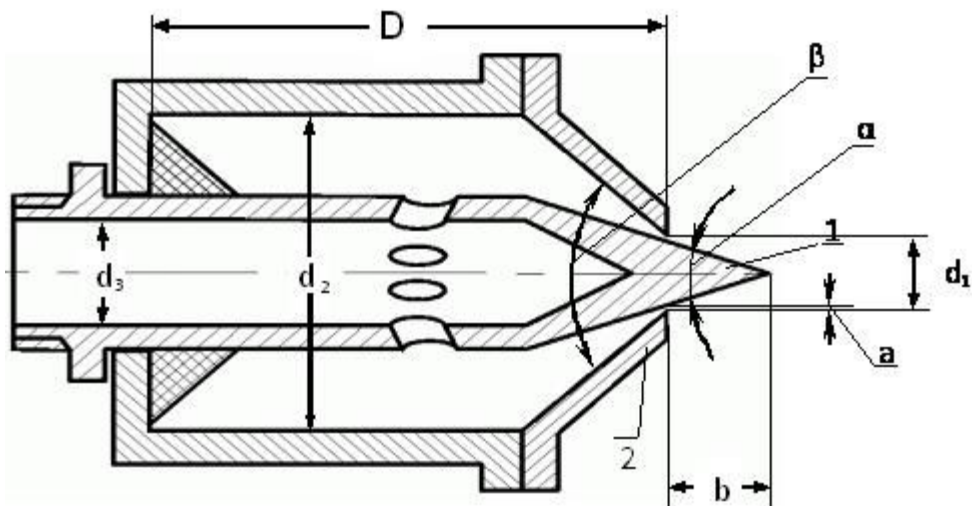
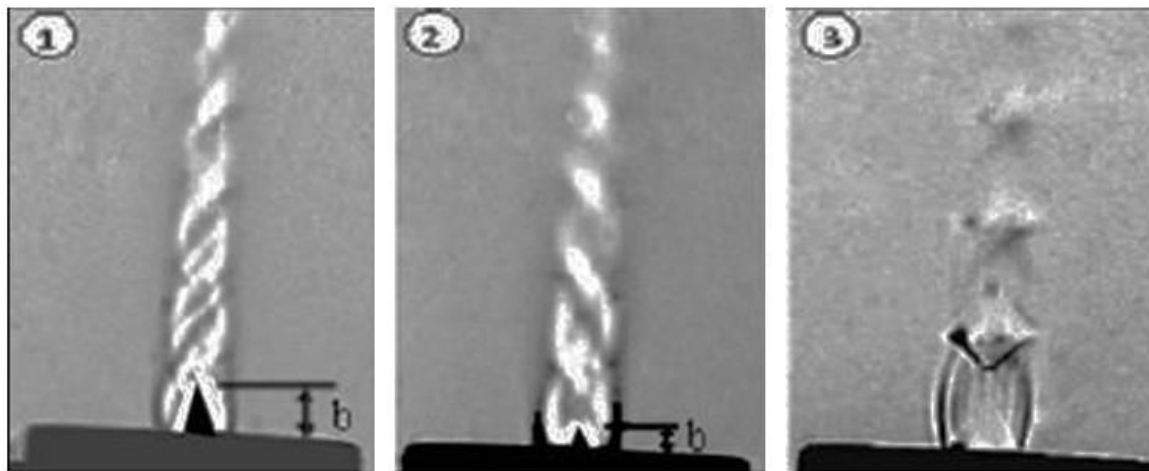


Рис.1. Конструкция сопла с центральным конусом(СЦК): 1 – внутренний конус, диаметр  $d_3=25$  мм, угол  $\alpha=30^\circ$ ; 2 – усечённый конус, диаметр  $d_2=60$  мм, угол  $\beta=60^\circ$ ; зазор контролируемого критического сечения  $a=0,3\div 0,6$ мм, выступающая часть внутреннего конуса  $b=3 - 6$  мм, длина проточной камеры  $D=150$  мм,  $d_1$  – внешний диаметр щели на срезе сопла.

**2. Результаты эксперимента.** На снимках, полученных с помощью прибора Теплера, показаны необычные конфигурации затопленной недорасширенной сверхзвуковой струи,



представляющие собой две сужающиеся конусовидные сплетенные спирали, напоминающие «косичку» или структуру ДНК (рис. 2). В кадре 1 выступающая часть  $b$  центрального конуса равна 6 мм. При этом спирали струи, сплетенные друг с другом, соответствует правому винту (по часовой стрелке, если смотреть от сопла вдоль скорости истечения). В кадре 2 выступающая часть  $b$  центрального конуса равна 3 мм, а закрутка двух сплетенных спиралей соответствует левому винту. В проведенных экспериментах длина спиралей составляла 10 – 12 калибров сопла. Подобные структуры струи наблюдаются и при дозвуковом истечении газа из сопла.

Рис. 2. Теневые снимки истечения газа из СЦК при разных положениях внутреннего конуса: 1 –  $b=6$ мм, 2 –  $b=3$ мм, 3 –  $b=0$ мм. Давление в форкамере сопла  $6 \cdot 10^5$  Па.

Как видно из рис. 2.1, 2.2, струя сужается по ходу истечения, причём при уменьшении расстояния от вершины конуса до среза сопла происходит её постепенная трансформация (рис.2.1, 2.2) с волнами сжатия и разрежения, но без разрывов (ударных волн). На рис. 2. 3 видно, что, когда конус полностью убран, структура истечения соответствует маховскому отражению.

При использовании сопла диаметром среза 3 мм сужение и повышение плотности затопленной сверхзвуковой струи наблюдались на расстоянии 30 мм. Температура воздушной струи, измеренная тепловизором, равна  $12^\circ\text{C}$ , а атмосферного воздуха в окрестности истекающего из сопла потока –  $18^\circ\text{C}$ . При повышении давления конфигурация

струи приобретает чётко выраженную структуру косички. При изменении направления ориентации струи с отклонением от вектора земной гравитации наблюдается неустойчивость течения струи, что приводит к потере чёткости спиральной структуры.

При утоплении центрального конуса сопла вовнутрь форкамеры «косичка» трансформируется в поток с разрывами (с маховским отражением, как видно на рис. 2.3). На переходном и основном участках этой струи видна ячеистая конусовидная структура (кадр 3).

При обратном выдвигании конуса в направлении потока наблюдался эффект гистерезиса, т.е. скачкообразный переход от режима маховских волновых структур к режиму волновой завитой спирали.

**Заключение.** Изучалось влияние положения конуса относительно среза сопла и пространственной ориентации потока на режим истечения. Обнаружено, что регулирование положения конуса относительно сопла позволяет получать ранее неизвестную спирально-завитую структуру сверхзвуковой недорасширенной струи, образующуюся при достаточно большом выдвигании конуса за пределы среза сопла. Показано, что при изменении пространственной ориентации направления потока указанная структура струи теряет устойчивость. При втягивании вершины конуса к плоской границе среза сопла происходит скачкообразный переход к ударно-волновому режиму истечения с маховскими отражениями.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Черный Г.Г. Газовая динамика. – М.: Наука, 1988. 424 с.
2. Дулов В.Г., Г.А. Лукьянов. Газодинамика процессов истечения. – Новосибирск: Наука, 1984. 234 с.
3. Пирумов У.Г., Росляков Т.С. Течения газов в соплах. – М.: Изд-во «Московский университет», 1986. 288 с.
4. Хасанов Х., Петухов С.В. Динамический излучатель. Патент РФ №2058196 от 20 апреля 1996 г. Приоритет от 20 апреля 1990 года по заявке № 4816101.
5. Хасанов Х., Петухов С.В. Насадка гидромонитора. Патент РФ № 1771512 от 20 апреля 1992 г. Приоритет от 20 апреля 1990 по заявке № 4816554.

