

03

Влияние размера сопла на дальность сверхзвуковой микроструи

© В.М. Анискин, А.А. Маслов, С.Г. Миронов

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича
СО РАН, Новосибирск
Новосибирский государственный университет, Новосибирск
E-mail: aniskin@itam.nsc.ru

Поступило в Редакцию 15 июня 2011 г.

Приведены результаты исследования газодинамической структуры сверхзвуковых недорасширенных осесимметричных микроструй азота, истекающих из звуковых сопел диаметром 10–340 μm . Получены данные по средней длине ячеек волновой структуры струй на их начальном участке и длине сверхзвукового участка струй. Показано существенное увеличение относительной длины сверхзвукового участка струи при уменьшении диаметра сопла до величины менее $\cong 20 \mu\text{m}$. Результаты измерений сопоставлены с известными данными, полученными для газовых макро- и микроструй.

В последнее время сверхзвуковые микроструи нашли применение для управления газодинамическими течениями [1–3]. Основным преимуществом микроструй является локальность воздействия и возможность создания массивов микроструй высокой плотности без увеличения расхода газа. Эффективность применения сверхзвуковых микроструй зависит от длины их сверхзвукового участка (дальности), который в свою очередь определяется диаметром и числом Маха на выходе сопла, степенью нерасчетности струи, показателем адиабаты газа. В работах [4,5] на основе обработки экспериментальных данных для макроструй, полученных в широком диапазоне размеров сопел, чисел Маха, степени нерасчетности и температуры газа, были построены универсальные зависимости, связывающие степень нерасчетности струи и длину ее сверхзвукового участка. В этих зависимостях, при прочих равных условиях, длина сверхзвукового участка пропорциональна выходному диаметру сопла. Влияние на длину сверхзвукового участка струи масштабного фактора сопла в области микронных размеров ранее

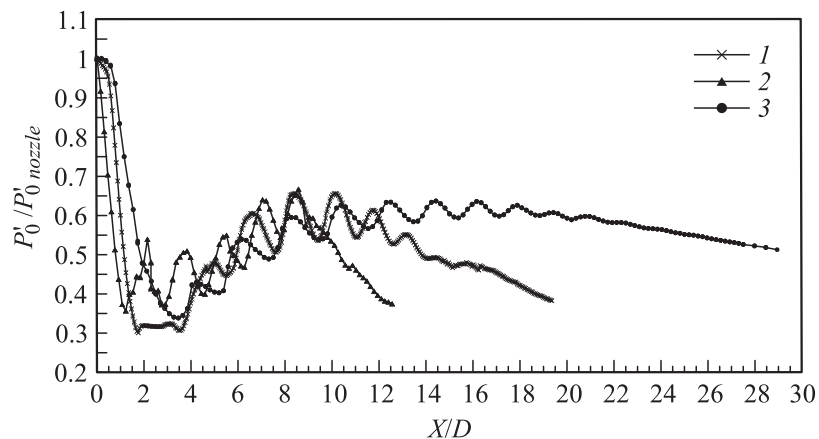


Рис. 1. Распределение полного давления вдоль оси струи для различных диаметров сопел, степень нерасчетности струй $N = 3$. 1 — $340 \mu\text{m}$; 2 — $65.3 \mu\text{m}$; 3 — $10.4 \mu\text{m}$.

не исследовалось. Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния диаметра звукового сопла на длину сверхзвукового участка азотной струи, истекающей в атмосферу.

В экспериментах была исследована газодинамическая структура сверхзвуковых струй азота, истекающих из круглых звуковых сопел с острой кромкой диаметром $D = 10.4, 23, 65.3$ и $340 \mu\text{m}$. Дозвуковая часть сопел представляла собой коническое сужение с начального диаметра 4 mm под углом 47° . Величина шероховатости кромки сопел составляла $\cong 1 \mu\text{m}$. Отверстие сопел находилось на оси цилиндрического соплового блока с плоским торцом диаметром 6 mm . Эксперименты были выполнены при комнатной температуре газа в диапазоне величины нерасчетности струи $N = 1.38\text{--}4.2$, что соответствует диапазону чисел Маха расчетной струи $M_j = 1.25\text{--}2.06$.

Измерения в струе производились трубкой полного напора (трубкой Пито) диаметром $12 \mu\text{m}$ с толщиной стенок $0.1 \mu\text{m}$. Измерялось распределение полного давления вдоль оси струи. Одновременно регистрировалось давление азота в камере перед соплом.

На рис. 1 для примера приведены распределения полного давления по оси струи, нормированного на полное давление на срезе сопла,

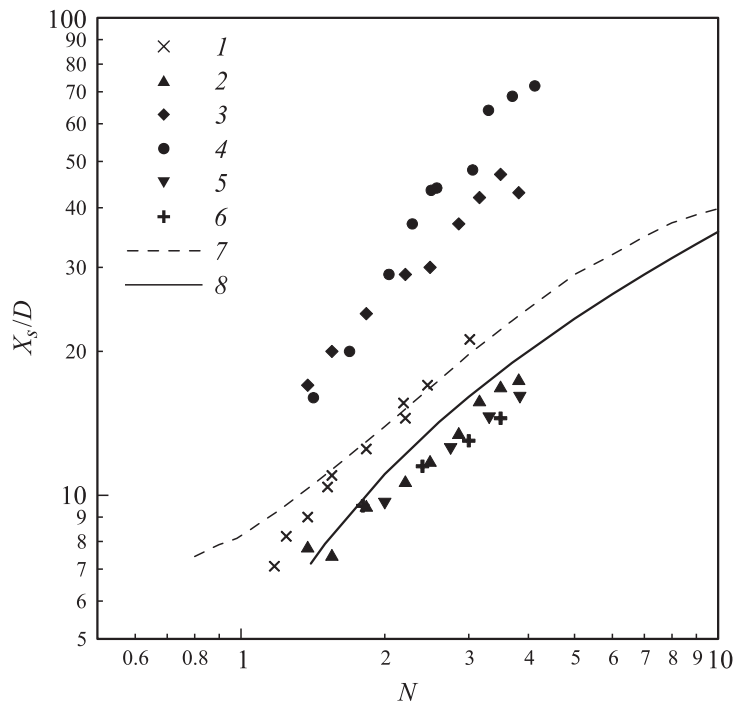


Рис. 2. Зависимость относительной длины сверхзвукового участка от степени нерасчетности струи для различных диаметров сопел: 1 — 340 μm ; 2 — 65.3; 3 — 23; 4 — 10.4; 5 — 200 [6]; 6 — 400 μm [6]. Кривые 7 и 8 соответствуют данным работ [4,5] для газовых макроструй.

для трех диаметров сопла. Видно, что с уменьшением диаметра сопла увеличивается относительная длина участка с периодическим изменением полного давления, что соответствует наличию в струе волновой структуры. Кроме того, увеличивается относительная длина участка струи, где величина полного давления превышает уровень, соответствующий переходу к дозвуковому течению.

На рис. 2 приведены данные измерений относительной длины сверхзвукового участка X_s/D в зависимости от степени нерасчетности струи N , полученных в данной работе и в работе [6]. На рис. 2 также приведены обобщенные зависимости из работ [4,5], полученные для ма-

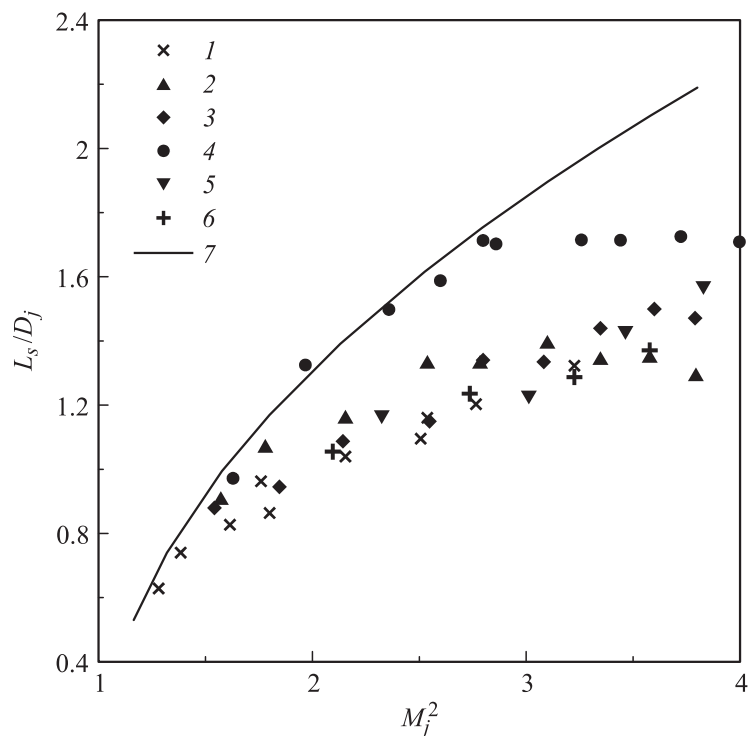


Рис. 3. Величина средней длины ячейки волновой структуры струи, нормированная на диаметр расчетной струи, в зависимости от квадрата числа Маха расчетной струи для различных диаметров сопел: 1 — 340 μm ; 2 — 65.3; 3 — 23; 4 — 10.4; 5 — 200 [6]; 6 — 400 μm [6]. Кривая 7 — линейная теория [7].

коструй. Видно, что длины сверхзвуковых участков струй, истекающих из сопел диаметром 60 μm и выше хорошо совпадают с обобщенными зависимостями. Для меньших диаметров имеет место существенное увеличение относительной длины сверхзвукового участка.

Для выявления причин увеличения относительной длины сверхзвукового участка струй, истекающих из сопел малого диаметра, были построены зависимости средней длины ячеек волновой структуры струи L_s , нормированной на диаметр расчетной струи D_j от квадрата числа Маха расчетной струи M_j (рис. 3). Средняя длина ячеек опреде-

лялась на интервале со второй по пятую ячейку волновой структуры струи. На графике рис. 3 также приведена зависимость, рассчитанная согласно линейной теории [7] для круглой струи идеального газа. Видно, что с уменьшением диаметра сопла точки отклоняются от теоретической зависимости при больших значениях величины M_j^2 . Однако средняя длина ячеек мало отличается друг от друга, за исключением струи, истекающей из сопла $D = 10.4 \mu\text{m}$, длина ячеек которой несколько больше.

Наиболее значительные изменения в безразмерных параметрах струй при изменении диаметра сопел касаются числа Рейнольдса Re_D , вычисленного по параметрам потока на выходе из сопла и его диаметру. Для сопел диаметром $200 \mu\text{m}$ и более числа Re_D превышают величину 10^4 . Для сопел диаметром $10.4 \mu\text{m}$ и $23 \mu\text{m}$ числа Re_D лежат в области значений $\leq 10^3$. Согласно данным [8], область чисел $Re_D \cong 10^3 - 10^4$ разделяет режимы ламинарного и турбулентного истечения недорасширенных макроструй на их начальном участке. Турбулентность струи приводит к быстрому смешению высокоскоростного потока с окружающей атмосферой и снижению ее скорости до дозвуковых значений. Наблюдаемое повышение устойчивости микроструй, истекающих из сопел диаметром 10.4 и $23 \mu\text{m}$, может быть также объяснено уменьшением размерной длины их сверхзвукового участка, в слое смешения которого не успевает развиться турбулентное течение и который на всем протяжении остается ламинарным. Каких-то качественных изменений характеристик устойчивости слоя смешения микроструй не следует ожидать. Так, исследования, выполненные в работе [9] для недорасширенной сверхзвуковой и дозвуковой микроструй, истекающих из щелевого сопла с поперечным размером $17 \mu\text{m}$, показали, что в слое смешения такой микроструи присутствуют вихри Гертлера и имеют место процессы перехода к турбулентности, характерные для струй макроскопического размера.

Кроме того, в сверхзвуковых нерасчетных макроструях переход к турбулентности в слое смешения инициируется так называемым дискретным тоном. Это особенно характерно для струй с большим отношением диаметра торца соплового блока к диаметру выходного отверстия сопла. Частота дискретного тона обратно пропорциональна длине ячеек волновой структуры и для сопел 10.4 и $23 \mu\text{m}$ должна быть порядка 10^7 Hz. Акустические волны на таких частотах мгновенно затухают в атмосфере и не формируют цепи обратной

связи автоколебательного процесса дискретного тона, что затягивает ламинарно-турбулентный переход в слое смешения.

Таким образом, впервые обнаружено значительное увеличение относительной длины сверхзвукового участка осесимметричных недорасширенных азотных струй, истекающих в атмосферу из звуковых сопел диаметром 10.4 и 23 μm . Показано, что относительная протяженность сверхзвукового участка недорасширенных микроструй, истекающих из сопел диаметром более 65.3 μm , хорошо описывается обобщающими зависимостями, полученными для струй макроскопического размера. Показано слабое влияние размера сопла на среднюю длину ячеек волновой структуры начального участка недорасширенной микроструи.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 11-08-00205-а), междисциплинарного интеграционного проекта президиума СО РАН № 110 и программы президиума РАН № 11/10.

Список литературы

- [1] *Kumar V., Alvi F.S.* // AIAA J. 2006. V. 44. N 2. P. 273–281.
- [2] *Zhuang N., Alvi F.S., Alkislar M.B., Shin C.* // AIAA J. 2006. V. 44. N 9. P. 2118–2128.
- [3] *Lou H., Alvi F.S., Shih C.* // AIAA J. 2006. V. 44. N 11. P. 58–66.
- [4] *Shirie J.W., Seubold J.G.* // AIAA J. 1967. V. 5. N 11. P. 2062–2064.
- [5] *Погорелов В.И.* // ЖТФ. 1977. Т. 47. В. 2. С. 444–445.
- [6] *Phalnikar K.A., Kumar R., Alvi F.S.* // Exp. Fluids. 2008. V. 44. P. 819–830.
- [7] *Pack D.C.* // Q. J. Mech. Appl. Math. 1950. V. 3. P. 173–181.
- [8] *Авдеевский В.С., Иванов А.В., Карпман И.М.* и др. // Докл. АН СССР. 1971. Т. 197. № 1. С. 46–49.
- [9] *Фомин В.М., Анискин В.М., Маслов А.А.* и др. // Докл. РАН. 2010. Т. 433. № 5. С. 635–638.