

03

## Реламинаризация в сверхзвуковых микроструях при низких числах Рейнольдса

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

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

Поступило в Редакцию 9 апреля 2013 г.

Приведены результаты измерений длины сверхзвукового участка воздушных струй, истекающих из осесимметричных звуковых сопел диаметром от  $10.4 \mu\text{m}$  до  $1 \text{ mm}$ . Измерения выполнены в диапазоне степени нерасчетности струй от 1 до 30 и в широком диапазоне чисел Рейнольдса, включающем ламинарный и турбулентный режимы течения. Показано, что число Рейнольдса, вычисленное по диаметру сопла и параметрам газа на его выходе, является определяющим параметром струйного течения. Показано, что в случае ламинарного слоя смешения струи происходит резкое увеличение длины сверхзвукового участка. При турбулизации слоя смешения струи длина сверхзвукового участка уменьшается. Впервые обнаружен эффект увеличения длины сверхзвукового участка после его уменьшения в результате турбулизации течения в струе при росте величины числа Рейнольдса.

В настоящее время сверхзвуковые газовые микроструи нашли широкое применение в технологических процессах, авиации и космонавтике. Эти практические потребности определили интерес к исследованию устойчивости сверхзвуковых струй. В частности, важной проблемой является влияние числа Рейнольдса струи и абсолютного размера сопла на длину сверхзвукового участка (дальнобойность) струи.

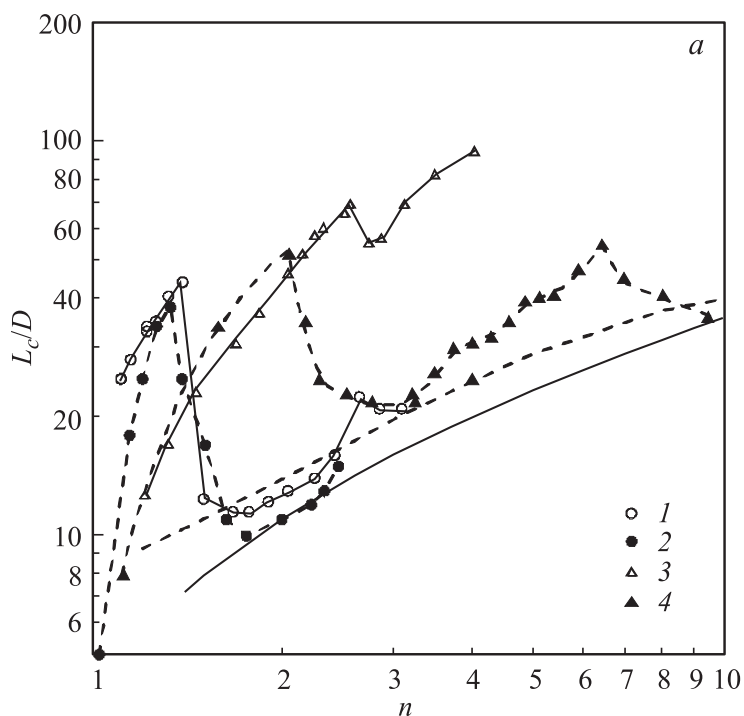
В работах [1–3] были выполнены экспериментальные исследования газодинамической структуры недорасширенных сверхзвуковых струй, истекающих в атмосферу из осесимметричных звуковых микросопел диаметром  $D$  от  $10.4$  до  $340 \mu\text{m}$ , в диапазоне величины степени нерасчетности струи  $n$  от 1 до 4.3. Было показано значительное увеличение относительной длины сверхзвукового участка струй  $L_c/D$  для сопел диаметром менее  $60 \mu\text{m}$  по сравнению с длиной сверхзвуко-

вого участка турбулентных макроструй [4,5] для равных значений  $n$ . Однако по достижении определенного значения  $n$  длина сверхзвукового участка микроструй резко снижалась до величин, соответствующих длине сверхзвукового участка турбулентных макроструй. Эти значения  $n$  соответствовали числам Рейнольдса  $Re = 1000-2000$ , вычисленным по диаметру сопла и параметрам потока на его выходе.

Для выявления роли масштабного фактора сопла и числа  $Re$  струи в изменении относительной длины сверхзвукового участка от степени нерасчетности  $n$  в данной работе были выполнены измерения характеристик ударно-волновой структуры и длины сверхзвукового участка в осесимметричной недорасширенной струе, истекающей из звукового сопла миллиметрового размера в камеру низкого давления. Давление в камере могло изменяться от атмосферного до  $10^{-1}$  мм Hg. Эксперименты проводились с воздушными струями с комнатной температурой торможения. Величина  $n$  изменялась, как и в [1-3], повышением давления в сопле при фиксированном давлении в окружающем пространстве. Диагностика струй осуществлялась трубкой Пито, изготовленной из медицинской иглы с внутренним диаметром  $100 \mu\text{m}$ . Пневмодатчик мог перемещаться вдоль оси струи на расстояние  $200 \text{ mm}$  от кромки сопла координатным устройством. Давление в трубке Пито и окружающую струю пространство измерялось дифференциальными тензодатчиками давления ТМД4-ИВ1, давление воздуха в сопле — образцовым мембранным вакуумметром. Положение конца сверхзвукового участка струи  $L_C$  определялось по достижении давления в трубке Пито величины, соответствующей числу Маха на оси струи, равному единице. В этих экспериментах числа Рейнольдса миллиметрового сопла соответствовали числам Рейнольдса для микросопел.

Измерения средней длины второй, третьей и четвертой ячеек волновой структуры сверхзвуковой струи показали хорошее (в пределах  $10-15\%$ ) совпадение средней длины ячеек с данными измерений в микроструях [3] и турбулентных макроструях в диапазоне степени нерасчетности  $1 < n < 4$ . Это говорит об отсутствии заметного влияния масштабного фактора сопла на ударно-волновую структуру сверхзвуковых струй.

На рис. 1, *a, b* приведено сопоставление зависимостей  $L_C/D$  от  $n$ , полученных для ряда диаметров микросопел в [1,3] и миллиметрового сопла, при близких значениях числа Рейнольдса. Результаты измерений показали хорошее качественное и удовлетворительное количественное



**Рис. 1.** Зависимости относительной длины сверхзвукового участка струи от нерасчетности струи. Зависимости для реальных сопел диаметром: 1 — 44,6, 3 — 16,1, 5 — 21,4, 7 — 10,4  $\mu\text{m}$ ; для эффективных сопел диаметром: 2 — 53, 4 — 17,7, 6 — 23,7, 8 — 11,8  $\mu\text{m}$ . Пунктирная и сплошная кривые — данные для турбулентных макроструй [4,5].

согласование зависимостей для реальных и эффективных микросопел с близкими диаметрами. Зависимости на рис. 1 говорят о том, что число  $Re$  является главным параметром, влияющим на зависимость  $L_C/D$  от  $n$ . Тем не менее здесь имеют место некоторые отличия в зависимостях и влияние масштаба сопел нельзя полностью исключить.

На рис. 2 представлены результаты определения дальности струй  $L_C/D$  при числах  $Re$ , соответствующих соплам диаметром менее 10  $\mu\text{m}$ . Из графиков видно, что с понижением эффективного диаметра сопла величина  $n$  начала падения относительной дальности  $L_C/D$ ,

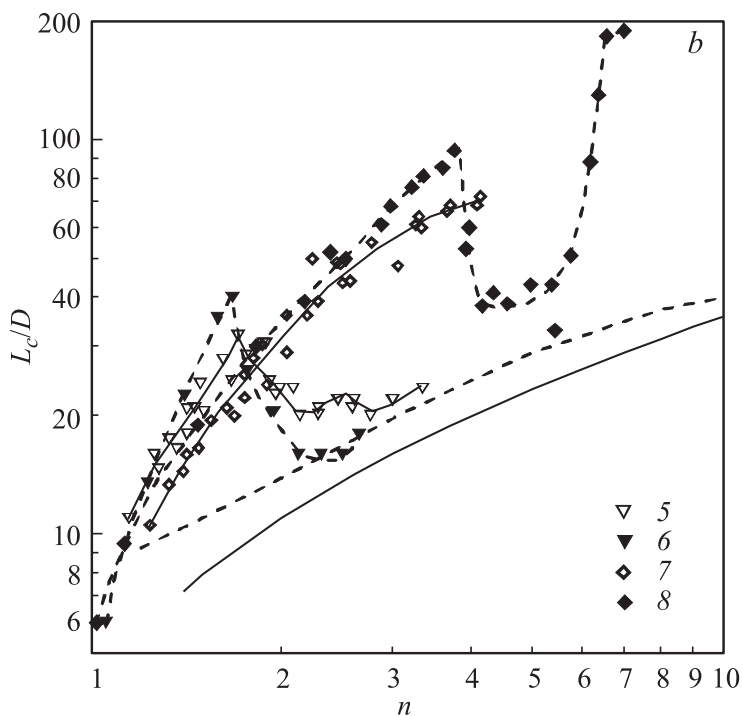
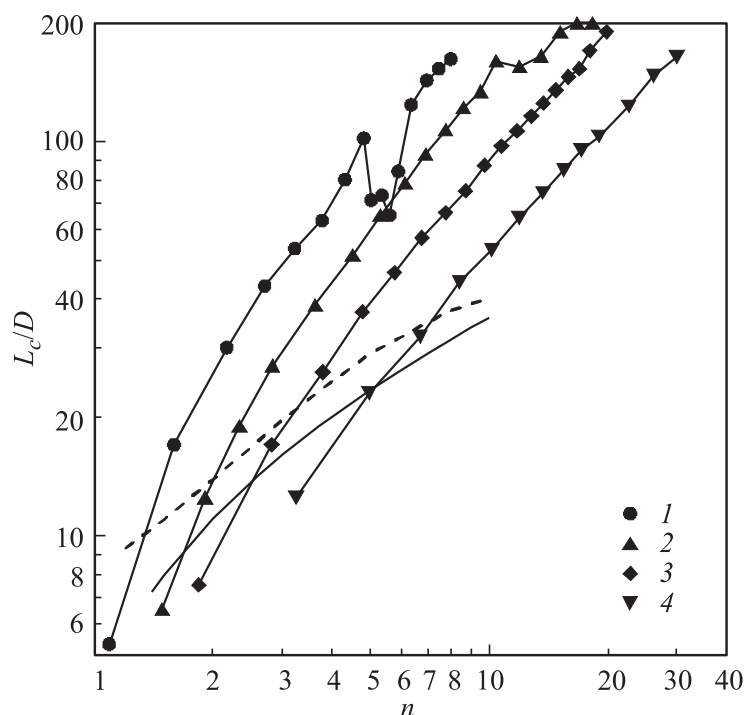


Рис. 1 (продолжение).

так же как и на рис. 1, смещается в сторону больших значений при одновременном уменьшении глубины снижения величины  $L_c/D$ . Особое внимание на рис. 1 и 2 следует обратить на повторный рост величины  $L_c/D$  после ее снижения.

Для понимания причин изменения дальности микроструй были проведены измерения пульсаций массового расхода проволоочным датчиком термоанемометра. Датчик располагался в центре струи перпендикулярно ее оси.

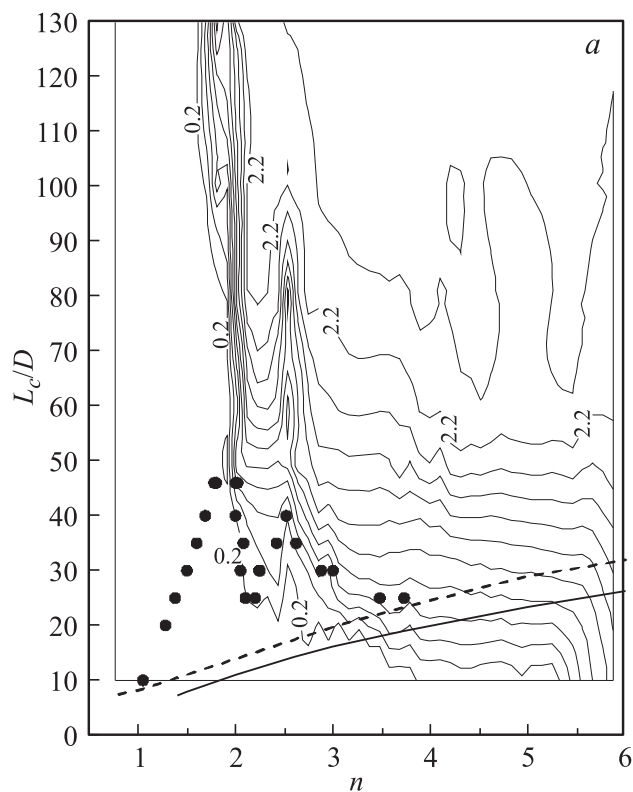
На рис. 3 приведены зависимости дальности струй  $L_c/D$  от  $n$  для реальных микроструй, истекающих из сопел диаметром 26 и 24.3  $\mu\text{m}$ . На эти графики наложено поле изолиний интегральных



**Рис. 2.** Зависимости относительной длины сверхзвукового участка струи от нерасчетности струи для эффективных сопел диаметром: 1 — 8,9, 2 — 5,9, 3 — 4,2, 4 — 2,4 мкм. Пунктирная и сплошная кривые — данные для турбулентных макроструй [4,5].

пульсаций массового расхода, полученных с помощью термоанемометрических измерений. Видно, что снижение величины дальности струи сопровождается резким ростом значений интегральных пульсаций массового расхода. Это было интерпретировано как проявление ламинарно-турбулентного перехода в слое смешения сверхзвуковой микроструи.

Повторный рост длины сверхзвукового участка сопровождается снижением уровня пульсаций массового расхода в струе (рис. 3, *a*), а в некоторых случаях (рис. 3, *b*) и полным исчезновением пульсаций. Это



**Рис. 3.** Зависимости относительной длины сверхзвукового участка струи от нерасчетности струи и изолинии интегральных пульсаций массового расхода для реальных микроструй, истекающих из сопел диаметром 26 (а) и 24.3  $\mu\text{m}$  (b).

явление напоминает реламинизацию течения, которое наблюдается при определенных условиях в пограничных слоях, и было обнаружено в сверхзвуковых струях впервые. Наличие реверса в длине микроструй, истекающих в атмосферу, было подтверждено шпирен-визуализацией струйного течения.

Таким образом, было показано, что число Рейнольдса, вычисленное по диаметру сопла и параметрам потока на его выходе, может быть

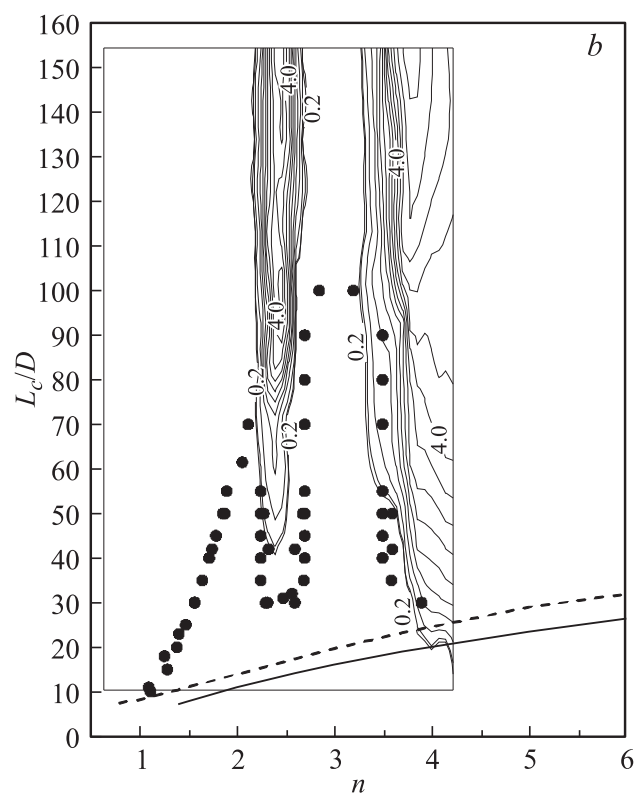


Рис. 3 (продолжение).

использовано для моделирования зависимости длины сверхзвукового участка струй от величины степени нерасчетности в широком диапазоне диаметров сопел. Впервые обнаружено явление восстановления длины сверхзвукового участка по мере роста величины числа Рейнольдса струи после ее уменьшения вследствие перехода струи в режим турбулентного течения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты 11-08-00205-а, 12-08-31265-мол\_а) и Проекта фундаментальных исследований президиума РАН № 25/13.

**Список литературы**

- [1] *Анискин В.М., Маслов А.А., Миронов С.Г.* // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 22. С. 10–15.
- [2] *Aniskin V.M., Mironov S.G., Maslov A.A.* // Intern. J. Microscale. Nanoscale. Therm. Fluid Transp. Phenomenon. 2012. V. 3. N 1. P. 49–59.
- [3] *Aniskin V.M., Mironov S.G., Maslov A.A.* // Microfluidics Nanofluidics. 2013. V. 14. N 3. P. 605–614.
- [4] *Shirie J.W., Siebold 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.