

# СТРУКТУРА СВЕРХЗВУКОВОЙ ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ МИКРОСТРУИ АЗОТА

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

Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,  
Новосибирск

## THE STRUCTURE OF THE SUPERSONIC AXISYMMETRIC NITROGEN MICROJET

V.M. Aniskin, A.A. Maslov, S.G. Mironov

Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS, Novosibirsk

*The present work is dedicated to the results of the research of the gas-dynamic structure of axisymmetric supersonic underexpanded nitrogen microjet at different underexpansion levels. The axisymmetric nozzles had the outlet diameter from 60  $\mu\text{m}$ . The measurements were carried out with the aid of a specially made Pitot tube. For the axisymmetric microjets, the total pressure values were measured along the flow axis at different values of the stagnation pressure. Wave structure positions were determined, the results were compared to the experiments on macro-size jets.*

### Введение

В последние годы наблюдается растущий интерес к изучению высокоскоростных дозвуковых и сверхзвуковых газовых микроструй в силу потенциальной возможности их использования в микрореактивных двигателях [1], в микроустройствах пневмоники, для охлаждения элементов микроэлектроники [2] и для активного управления газодинамическими течениями [3,4].

Принципиальной проблемой микротечений и, в частности, микроструй является роль масштабного фактора в ряде явлений, наблюдаемых в макроскопических струях. Это касается формирования волновой структуры сверхзвуковой струи, возникновения вихрей Гертлера, развития неустойчивости сдвигового течения и восприимчивости струйного течения к акустическому воздействию. Решение этой проблемы может быть получено в исследованиях среднего течения и характеристик пульсаций в газовых струях, истекающих из микросопел различного размера в диапазоне от долей миллиметра до нескольких микрон и сопоставления полученных данных с теоретическими расчетами и результатами для макроскопических сопел.

В данной работе впервые представлены результаты исследования газодинамической структуры осесимметричной сверхзвуковой микроструи азота.

### Экспериментальное оборудование и методы диагностики

Сверхзвуковая недорасширенная струя азота комнатной температуры истекала из микросопла в атмосферу. В экспериментах использовалось осесимметричное сопло диаметром 60 мкм.

На рис.1 приведена схема сопла и электронная фотография выходного сечения микросопла. Размер шероховатостей кромок сопла составлял величину  $\cong 1$  мкм.

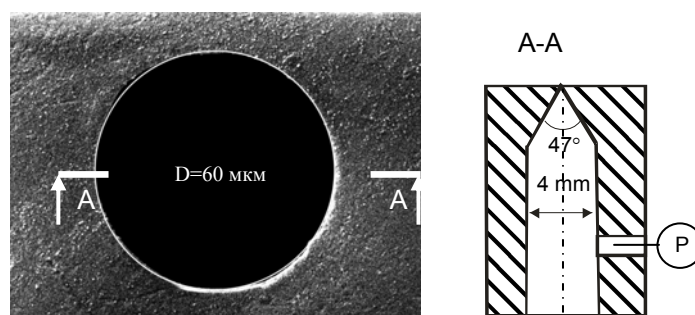


Рис. 1. Осесимметричное сопло

Измерения были выполнены для десяти различных давлений газа в форкамере. В таблице приведены условия проведения экспериментов.

$P_0$ , атм	NRP	N	Re	$M_i$	Kn
0.227 (2.24)	2.24	1.2	1927	1.14	0.0005
0.264 (2.61)	2.61	1.38	2246	1.25	0.00045
0.297 (2.93)	2.93	1.55	2521	1.33	0.0004
0.352 (3.47)	3.47	1.83	2986	1.47	0.00034
0.423 (4.17)	4.17	2.21	3588	1.59	0.00028
0.476 (4.7)	4.7	2.5	4044	1.67	0.00025
0.547 (5.4)	5.4	2.86	4647	1.76	0.00022
0.608 (6)	6	3.16	5163	1.83	0.00019
0.672 (6.63)	6.63	3.5	5705	1.89	0.00018
0.733 (7.23)	7.23	3.82	6221	1.96	0.00016

Исследование структуры микроструй проводилось с помощью специально изготовленной трубки Пито микронного размера (Рис.2). Конструктивно устройство состояло из трех элементов: приемника давления, пневмотрассы и приемной трубки. В качестве приемника давления использовался датчик давления (Honeywell, 100 psi). Пневмотрасса была выполнена из стеклянной трубки, изогнутой под углом 90-120°. Стеклянная трубка имела длину 15-20 мм и внешний диаметр порядка 0.3-0.4 мм. Одним концом трубка герметично закреплялась непосредственно к приемному отверстию датчика давления. Другой конец стеклянной трубки имел сужение, в которое помещалась приемная микротрубка. Пространство между внутренней поверхностью стеклянной трубки и микротрубкой заполнялось эпоксидным компаундом. Приемная микротрубка имела внешний диаметр 12 мкм при толщине стенки  $\approx 0.1$  мкм. Микротрубка была изготовлена путем самосворачивания напряженной гетеропленки по технологии, описанной в [5].

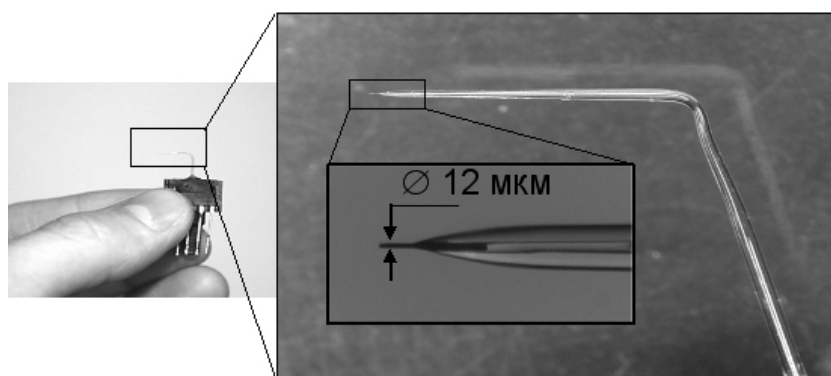


Рис.2. Микротрубка Пито

Датчик давления закреплялся на державке, которая перемещалась в пространстве микроманипулятором Narishige NT-88E с точностью 1 мкм по трем взаимно перпендикулярным направлениям. Контроль за положением приемной трубки осуществлялся визуально через оптический микроскоп Nikon SMZ1500.

Точность установления давления в форкамере сопла составляла 1.5-2% при  $N < 2$  и 0.5-1% при  $N > 2$ . Точность позиционирования приемной трубки в плоскости сопла составляла  $\pm 10$  мкм для щелевого сопла и  $\pm 5$  для круглого.

### Результаты эксперимента

Для круглого микросопла были выполнены измерения величины давления полного напора на оси струи. Шаг перемещений трубки Пито составлял 10 мкм. Результаты этих измерений приведены на рис.3, а.б. На графиках по оси ординат показано расстояние от

среза сопла нормированное на диаметр сопла. По оси абсцисс отложено значение полного напора, измеряемого трубкой Пито, нормированное на величину полного напора на срезе сопла.

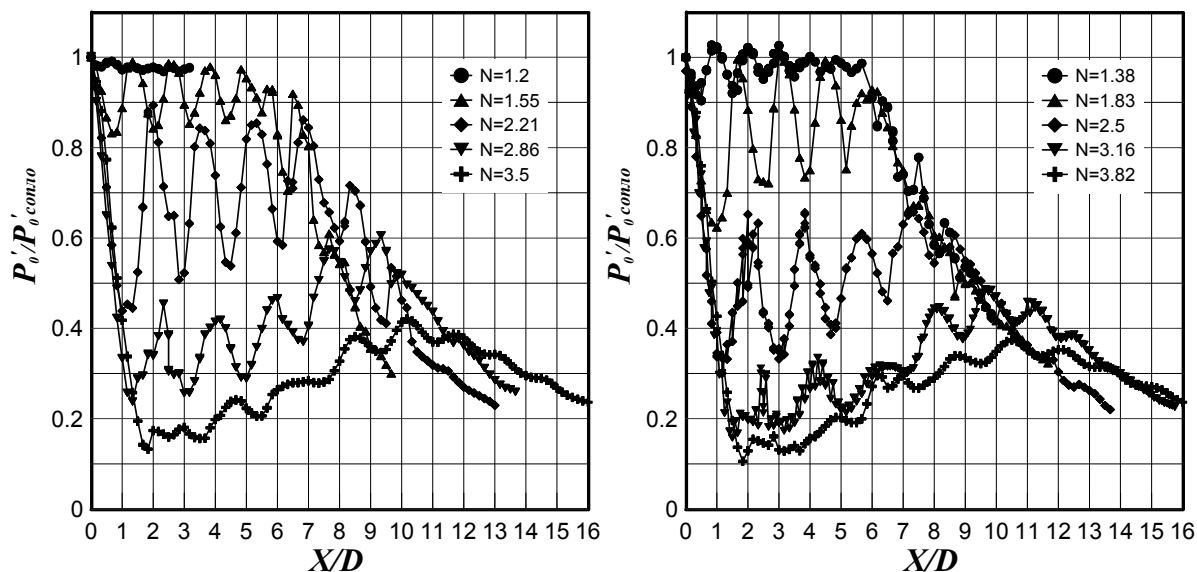


Рис.3. Осевое распределение величины давления полного напора

Значение полного напора вдоль оси струи, приведенное на рис3, а,б, имеет характерное квазипериодическое распределение, обусловленное волновой структурой струи. На графиках четко просматривается от 7 до 10 (при  $N=1.38$ ) бочек. Только лишь при самом малом значении нерасчетности струи ( $N=1.2$ ) уверенно просматриваются не более 4 бочек.

Были получены профили поперечного распределения значений полного напора в диапазоне расстояний  $x/d=0.5 \div 4.8$  для различных значений нерасчетности. На рис.4 показаны профили для значения нерасчетности  $N=1.83$  полученные на расстояниях  $x/d=0.5, 1, 1.7, 2.5, 3$ . Радиальная координата нормирована на диаметр сопла, значения полного напора нормированы на его величину на срезе сопла.

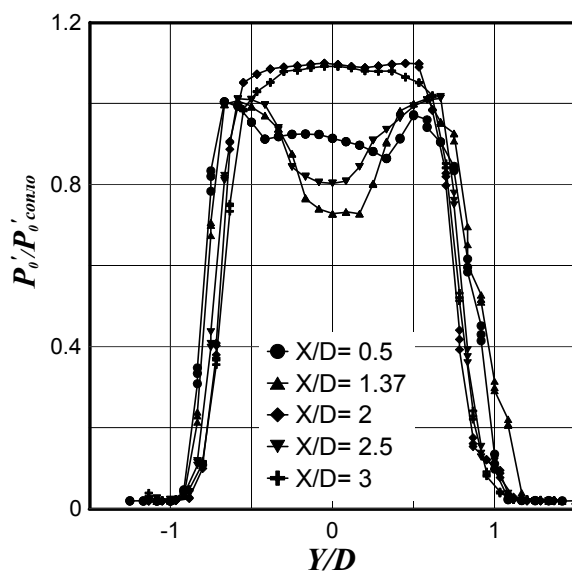


Рис.4. Поперечное распределение значений полного давления  $N=1.83$

На рис.5,а показано трехмерное распределение значений полного напора для  $N=3,16$  в диапазоне расстояний  $x/d=0.8 \div 4.8$ , построенное по 13-ти сечениям. На рис 5,б приведены изолинии значений полного напора. Четко просматривается вторая бочка, часть первой и начало третьей. Видно, что на оси струи ( $y/d=\pm 0.1$ ) в диапазоне расстояний  $x/d=1.5 \div 3.5$

значение полного напора практически не меняется. Этот факт объясняет сложность определения положения первой бочки при осевых измерениях трубкой Пито при больших значениях нерасчетности. Наблюдаемые на графиках (рис.3) флуктуации значений полного напора для нерасчетностей  $N=3.16$ ,  $3.5$  и  $3.82$  (в диапазоне расстояний  $x/d=1.5 \div 3.5$ ) объясняются погрешностью положения приемной трубки.

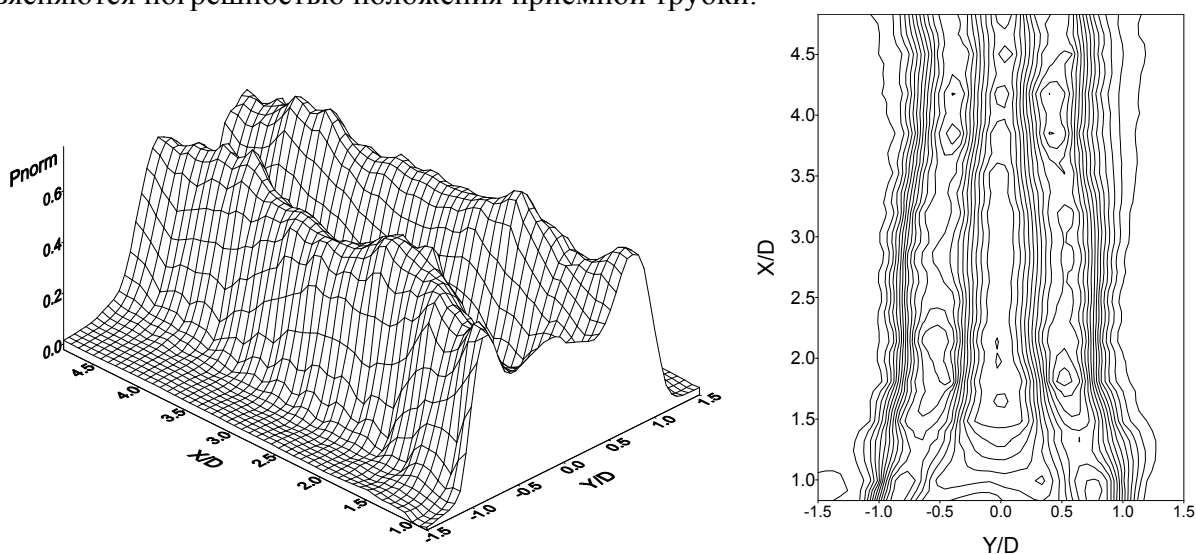


Рис.5. Поперечное распределение значений полного давления  $N=3.16$

На рис.6 показано положение бочек в зависимости от нерасчетности струи. Круглыми метками показаны данные настоящего исследования. Квадратными метками приведены результаты работы [8] для сопла диаметром 14 мм, полученными с помощью фотографий визуализации течения. Крестообразными метками показаны результаты работы [9] для сопла диаметром 40 мм, полученными с помощью трубки Пито. Видно хорошее совпадение данных, полученных для микроструй с данными для струй макро размера.

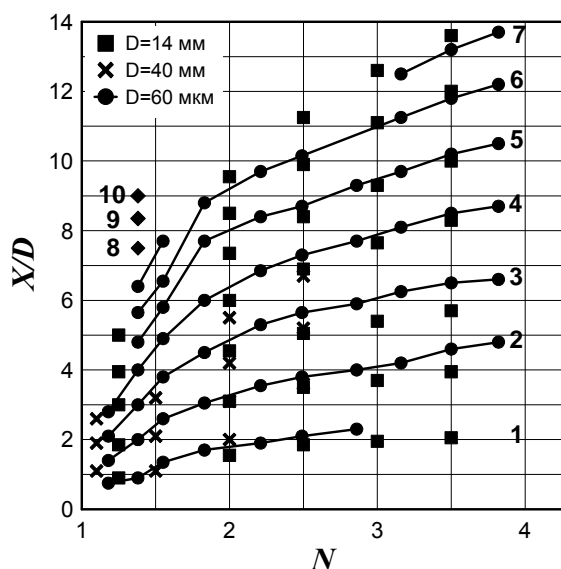


Рис.6. Положение бочек в зависимости от нерасчетности струи

На рис. 7 приведено значение длины бочки  $L_s$ , нормированное на диаметр струи  $D_j$  в зависимости от квадрата числа Маха струи  $M_j$ . Сплошной линией показаны значения, полученные по линейной теории. На графике приведены данные настоящей работы, из указанных выше [8], а также из работы [10]. В работе [10] авторы методом теневой визуализации и трубкой Пито исследовали сверхзвуковое течение из круглых сопел диаметром 200 и 400 мкм.

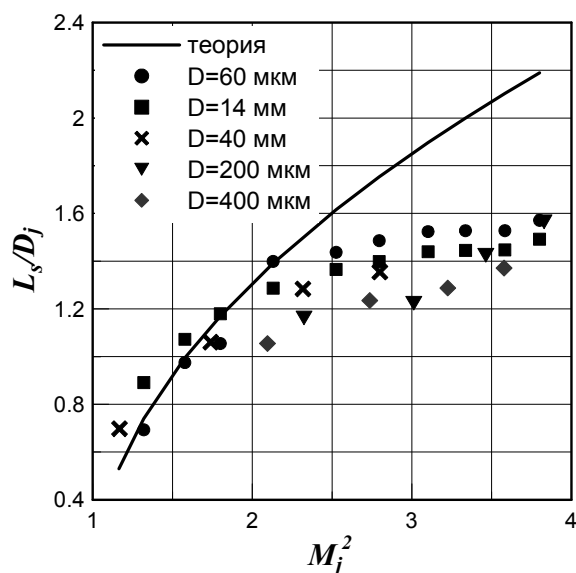


Рис.7. Сравнение результатов

Видно, что линейная теория хорошо описывает слабонедорасширенные сверхзвуковые струи как макро размера, так и микроструи. Несовпадение данных из работы [10] для сопел 200 и 400 мкм, возможно объясняется ступенчатой внутренней поверхностью сопел, что приводит к существенным потерям давления, которые не были учтены авторами, и, как следствие, неточность определения числа Маха струи  $M_j$ .

### Выводы

Впервые экспериментально определена газодинамическая структура сверхзвуковой недорасширенной микроструи азота истекающих из осесимметричного сопла диаметром 60 мкм.

Для исследования структуры микроструи специально была изготовлена микротрубка Пито, диаметр приемной части которой составлял 12 мкм при толщине стенки 0.1 мкм.

Измерения, выполненные трубкой Пито на оси струи, показали квазипериодические изменения значений полного давления, обусловленные волновой структурой струи.

Проведенное сравнение полученных данных с данными для струй макро размера показало хорошее совпадение.

Линейная теория хорошо предсказывает параметры микроструи при малых значениях нерасчетности.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке междисциплинарного интеграционного проекта Президиума СО РАН №110 и проекта фундаментальных исследований Президиума РАН №11/10.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bayt R.L., Breuer K.S. Systems design and performance of hot and cold supersonic microjets. Paper AIAA. 2001-0721.
2. Fabbri M., Jiang S., Dhir V.K. Experimental investigation of single-phase micro jets impingement cooling for electronic applications. ASME Summer Heat Transfer Conf. 2003. Las Vegas. NV. Paper HT2003-47162.
3. Lou, H., Alvi, F.S. Shih C.. (2006). Active and passive control of supersonic impinging jets, *AIAA J*, 44, (11), 58–66.
4. Kumar V, Alvi F.S. (2006). Use of high speed microjets for active separation control in diffusers. *AIAA J* 44(2):273–281.

5. S. V. Golod, V. Ya. Prinz, P. Wagli, et al. (2004). Free-standing SiGe/Si/Cr and SiGe/Si/Si<sub>x</sub>N<sub>y</sub>/Cr microtubes,” *Appl. Phys. Lett.*, **84**, No. 17, 3391–3393.
6. Pack D. C. (1950). A note on Prandtl's formula for the wave-length of a supersonic gas jet. *Q. J. Mech. Appl. Math.***3**, 173-181
7. Zapryagaev B.И., Mironov S.G. (1993) Spectral composition of wave numbers of longitudinal vortices and characteristics of flow structure in a supersonic jet PMTF.. Vol. 34. No 5. P. 41-47.
8. Ostapenko V.A., Slotchin A.V., Serov Yu.V. Kudryavtsev A.N. Issledovanie mnogovolnnoj struktury sverkhzvukovoj neizobaricheskoj strui. Otchet no. 1770, ITPM SO RAN, 1987 [Investigation of multi-wave structure of supersonic nonisobaric jets, Report # 1770, ITAM of the SB RAS]
9. Glaznev V.N., Sulejmanov Sh., Gazodinamicheskie parametry slabonedorasshirenykh svobodnykh struj [Gas-dynamic parameters of weak underexpanded free jets]. Novosibirsk, Nauka, 1980
10. K.A. Phalnikar, R Kumar, F.S. Alvi. (2008). Experiments on free and impinging supersonic microjets, *Exp Fluids* 44:819-830.