

10. Дроздов Ю. Н. Обобщенные характеристики в анализе трения и смазки тяжело-нагруженных тел. *Машиноведение*, 1974, № 6.
11. Коул Дж. Методы возмущений в прикладной математике. М., «Мир», 1972.
12. Галазов М. А., Голубкин В. Н., Ширококов В. В. Реологические модели жидкости в экстремальных условиях и упругогидродинамика. *Числ. методы мех. сплошной среды*, 1976, т. 7, № 3.
13. Wymer D. G., Cameron A. Elastohydrodynamic lubrication of a line contact. *Proc. Instn Mech. Engrs*, 1974, vol. 188, No. 19.
14. Уидивен, Ивнс, Камерон. Оптический анализ масляного голодания в шариковом подшипнике. *Тр. Америк. о-ва инж.-механ., сер. Проблемы трения и смазки*, 1971, т. 93, № 3.

УДК 532.517.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАЧАЛЬНОГО УЧАСТКА КРУГЛОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУИ В ПОПЕРЕЧНОМ ПОТОКЕ

Л. Н. ВОЙТОВИЧ, Т. А. ГИРШОВИЧ, Н. П. КОРЖОВ

(Москва)

По экспериментальным данным (например, [1-9]) течение в струе, распространяющейся в поперечном потоке, имеет сложный характер: поперечное сечение струи на некотором удалении от среза сопла приобретает подковообразный вид, течение в струе трехмерное со сложной вихревой структурой и с продольным и поперечным градиентами давления, на сравнительно больших удалениях от среза сопла профили скорости и температуры имеют два максимума.

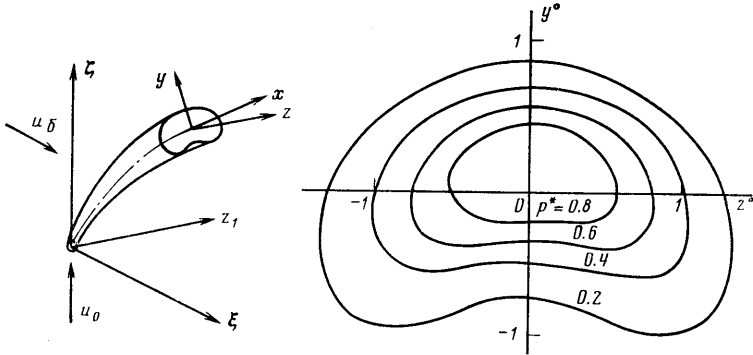
В большинстве экспериментальных работ изучается течение в основном участке. Однако эти данные не позволяют установить, за счет чего сформировывается такое сложное течение, а это необходимо знать для построения теоретической модели круглой струи в сносящем потоке. Такая модель до сих пор отсутствует. Противоречивы также данные об эжекционной способности струи, которая в [1, 6] считается такой же, как и у обычной затопленной струи, а в [3, 4] — существенно выше.

Формирование струи в сносящем потоке происходит на начальном участке. Здесь развивается зона смешения, течение в разных частях которой определяется воздействием меняющихся вокруг струи граничных условий. Поэтому представляет несомненный интерес подробное экспериментальное исследование начального участка струи в широком диапазоне изменения отношения скоростей струи и сносящего потока. Такое исследование может дать ключ к пониманию процесса формирования течения не только в самом начальном участке струи, но и на сравнительно больших удалениях от среза сопла. Следует отметить, что начальный участок струи в сносящем потоке изучен мало. Так, в [1] приводятся некоторые данные по траектории струи и по преобразованию круглого сечения струи в подковообразное, в [6-8] содержится анализ данных по распределению статических давлений на подстилающей поверхности вокруг струи, в [9] приведены результаты исследования влияния сносящего потока на распределение статического давления по срезу сопла, на расход газа через сопло и тягу.

В настоящей статье изложены некоторые результаты экспериментального исследования начального участка круглой струи, распространяющейся в сносящем потоке. Эксперимент проводился в дозвуковой аэродинамической трубе открытого типа диаметром 440 мм. Скорость в рабочей части трубы изменялась от 7,5 до 22 м/сек. Струя выдувалась перпендикулярно создаваемому аэродинамической трубой потоку из про-

филированного сопла с диаметром выходного сечения 19.5 мм. Срез сопла был выполнен заподлицо с отполированным экраном, который помещался в рабочей части аэродинамической трубы параллельно потоку. Расстояние от поверхности экрана до оси аэродинамической трубы составляло 170 мм. Для исследования распределения статического давления у подстилающей поверхности (экрана) вокруг струи экран был дренирован. Толщина пограничного слоя, измеренная на пластине перед соплом, составляла 5–6 мм. Воздух для питания струи подводился от компрессора через ресивер. Расход воздуха во всех опытах оставался постоянным, средняя скорость истечения струи была ~ 72 м/сек. Число Рейнольдса, подсчитанное по диаметру выходного сечения сопла, составляло $0.935 \cdot 10^5$.

В процессе эксперимента пятиканальным насадком с максимальным расстоянием между отверстиями 1.6 мм проводились исследования полей полного и статического



Фиг. 1

давлений, а также величины и направления скорости в диапазоне изменения отношения скоростей потока и струи $m=0-0.3$. При этом предварительно на каждом режиме 0, 0.05, 0.1, 0.2 и 0.3 определялась ось струи, как линия максимальных скоростей, а затем проводились измерения в сечениях, перпендикулярных этой оси, на расстояниях 1, 2.02, 4.34, 7.15 и 9.88 диаметра сопла, отсчитываемых по оси струи. Отметим, что результаты измерения траектории струи хорошо согласуются с данными [1, 2].

Измерения пятиканальным насадком проводились путем траверсирования струи вдоль оси z в исследуемой плоскости через промежутки Δy , обеспечивающие достаточную полноту представления о картине течения. Принятая система координат изображена на фиг. 1.

По результатам измерений, обработка которых проводилась на ЭВМ, в каждой плоскости строились графики скоростей, полных и статических давлений вдоль оси z при различных значениях y . По этим графикам, задаваясь постоянным значением параметра (скорости, полного и статического давлений), строились линии постоянных скоростей и давлений. Пример построения таких графиков приведен на фиг. 1 для $m=0.05$ при $x=9.88d$, где d — диаметр сопла, из которого происходило истечение. p^* — полное давление в заданной точке, p_{δ}^* и p_m^* — полное давление в сносящем потоке и на оси струи, соответственно, $y^{\circ}=y/d$, $z^{\circ}=z/d$, $p_0^*=(p^*-p_{\delta}^*)/(p_m^*-p_{\delta}^*)$.

На фиг. 2 результаты измерения распределения статических давлений вокруг струи на подстилающей поверхности сопоставляются с аналогичными данными [6–8]. Здесь $r^{\circ}=2r/d$, $\Delta p^{\circ}=2(p-p_{\delta})/\rho u_{\delta}^2$, $c_{\mu}=2/m^2$, r — радиус-вектор, отсчитываемый от центра сопла до заданной точки подстилающей поверхности, θ — полярный угол между осью y и радиус-вектором r , 1 — экспериментальные данные [6, 7], 2, 3 — соответственно данные [8] и авторов, кривые А соответствуют $\theta=0^{\circ}$, кривые Б — $\theta=90^{\circ}$.

Из графиков видно, что результаты измерений статических давлений, полученные в работе, в основном удовлетворительно согласуются с данными других авторов. Однако при малых скоростях сносящего потока ($m=0.05$ или $c_{\mu}=800$) наблюдается довольно существенное расхождение. Это расхождение требует специального исследования, так как с вопросом о распределении статических давлений вокруг струи связан вопрос об эжекционной способности струи и о соотношении между эжекцией струи, создающей вокруг нее разрежение, и торможением потока в результате которого давление в окрестности струи растет.

По данным авторов, получается, что с ростом скорости сносящего потока абсолютная величина разрежения перед струей сначала растет, а при $m=0.1$ и выше падает. Это может быть следствием того, что эжекционная способность струи в некотором диапазоне отношения скоростей сносящего потока и струи растет.

Располагание результатов данной работы и [6, 7], возможно, является следствием несколько различающихся условий проведения опытов, и прежде всего чисел Рейнольдса истечения струи. Кроме того, следует отметить, что при малых величинах отношения скоростей потока и струи точность определения величины Δp° уменьшается.

Расхождение экспериментальных данных может быть вызвано и тем, что данные из [6, 7], с которыми проводилось сопоставление, были получены для сопла «конус-цилиндр», а данные авторов настоящей статьи — для сопла, спрофилированного по Витошинскому, в то время как в [6] показано (фиг. 3), что способ профилирования сопла существенно влияет на величину разрежения вблизи струи. Обозначения 1, 2 на фиг. 3 — экспериментальные данные [6] ($c_\mu = 50$, $r^\circ = 2$) для разных видов профилирования струйных сопел: сопло Витошинского и «конус-цилиндр» соответственно, 3 — данные авторов.

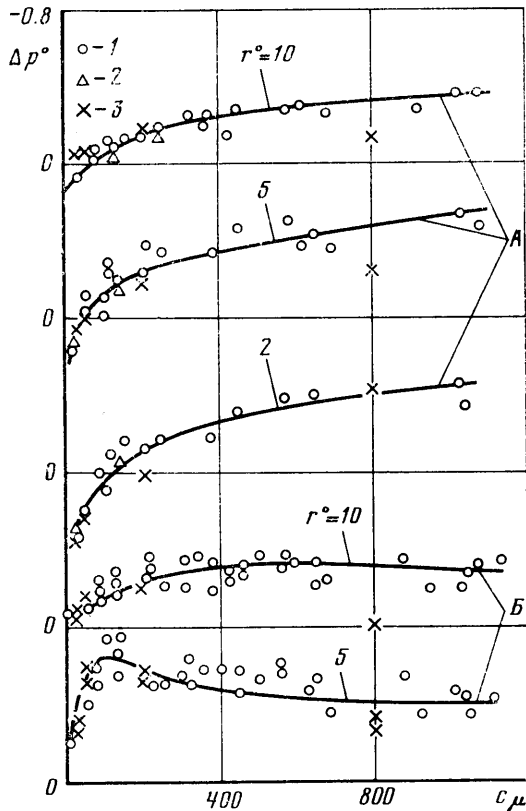
Из рассмотрения контуров границ потенциального ядра струи, которые определялись по профилям полного давления в плоскости симметрии струи, найдено, что, как и следовало ожидать, с ростом скорости сходящего потока потенциальное ядро укорачивается и отклоняется в сторону сходящего потока. Аналогичные результаты получены в [4].

Для получения представления о том, как формируется течение в начальном участке струи, определялись изменения передней к потоку и задней границ струи в плоскости ее симметрии и боковой границы потенциального ядра. Границы струи (наружные границы зоны смещения) определялись как линии, где избыточное давление в струе равнолось 0.2 избыточного полного давления в потенциальном ядре ($p_0^* = (p^* - p_0^*) / (p_m^* - p_0^*) = 0.2$). Границы ядра (внутренние границы зоны смещения) определялись как линии, на которых значение полного давления равно 0.95 полного давления в ядре струи.

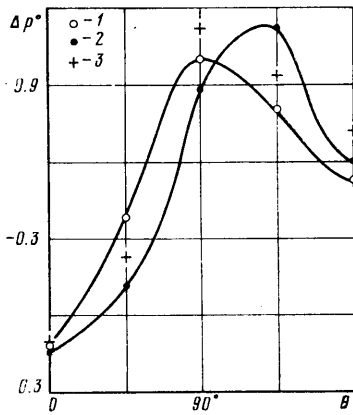
На фиг. 4 показано изменение границ ядра струи в плоскости симметрии, где обозначения 1–5 соответствуют режимам $m = 0, 0.05, 0.1, 0.2$ и 0.3 . Здесь же для сравнения помещены расчетные границы ядра затопленной струи, обозначенные прямой a . Из графика видно, что (как уже отмечалось выше) с ростом параметра m ядро укорачивается. При этом наблюдается тенденция к отрыву потока от задней стенки сопла. Для проверки этого факта, очевидно, требуется проведение специального исследования на сопле большего диаметра.

На фиг. 5 показано изменение передней и задней границ струи в плоскости ее симметрии с удалением от среза сопла и для разных отношений скоростей потока и струи. Здесь прямой a показана расчетная граница обычной затопленной струи, а обозначения 1–5 те же, что и на фиг. 4. Из графика видно, что с ростом параметра m передняя граница с удалением от среза сопла поджимается к оси струи, а затем степень ее расширения растет и граница приближается к границе затопленной струи. Задняя граница с ростом параметра m тоже приближается к оси (поджимается), но в отличие от передней границы, степень расширения которой на некотором расстоянии от среза сопла начинает расти, ширина задней части струи остается почти неизменной. Таким образом, струя под воздействием градиента давления как бы сплющивается, деформируется уже у самого среза сопла.

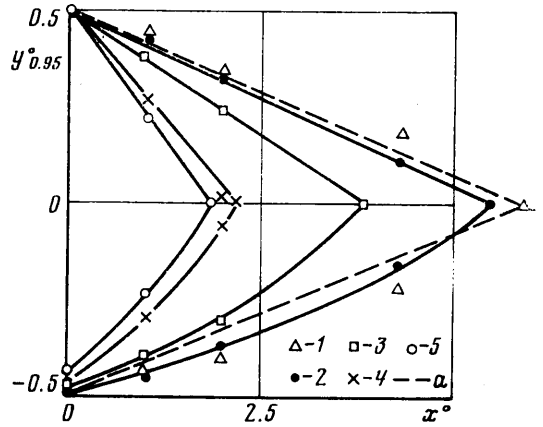
На фиг. 6 показано изменение боковой границы струи с удалением от среза сопла для разных значений параметра m (обозначения те же, что и на фиг. 5, причем кривые A соответствуют наружным границам зоны смещения, кривые B — границам



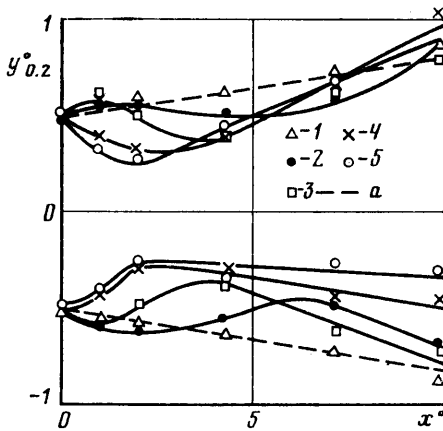
Фиг. 2



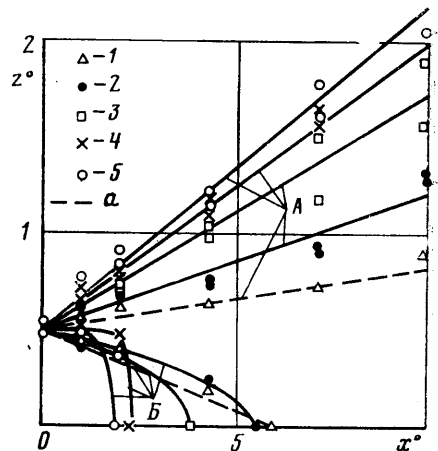
Фиг. 3



Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6

ядра). На этом же графике прямой a показана расчетная граница обычной затопленной струи. Из графика видно, что степень расширения боковой границы струи существенно выше, чем затопленной, и растет с ростом параметра m .

На этой же фигуре показано изменение боковой границы потенциального ядра. Из графика видно, что если при малых значениях параметра m боковая граница ядра ведет себя почти так же, как передняя и задняя, то с ростом m ордината боковой границы ядра имеет тенденцию к росту как при удалении от среза сопла, так и с увеличением скорости сносящего потока (по сравнению с ординатой границы ядра затопленной струи). В результате потенциальное ядро имеет не конусообразную форму, а клиновидную, примерно такую, какая наблюдается при истечении струи из прямоугольного сопла.

Из приведенных данных можно сделать вывод о том, что под воздействием сносящего потока и изменяющихся с ростом его скорости граничных условий вокруг струи течение уже на срезе сопла существенно перестраивается. Линии постоянных давлений (скоростей) уже на срезе сопла отличаются от окружностей (при $m > 0.1$ существенно). Струя в плоскости симметрии на небольшом удалении от среза сопла либо не расширяется, либо даже сужается. Этот факт говорит о том, что приток массы в струю из окружающего пространства через переднюю и заднюю поверхности струи в начальном участке не может быть большим и, видимо, не превышает притока массы к обычной затопленной струе. Большая степень расширения струи в боковом направлении говорит о том, что основной приток массы в струю, видимо,

происходит через ее боковые поверхности. Вопрос о количественном определении расхода всей массы, эжектируемой струей, т. е. вопрос о зависимости эжекционной способности струи от соотношения скоростей струи и сносящего потока сложен и требует специального рассмотрения.

Поступила 11 X 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. Шандоров Г. С. Истечение в сносящей поток из отверстий в стенке канала и распространение струй в сносящем потоке. Тр. ЦИАМ, 1955, № 263.
2. Иванов Ю. В. Эффективное сжигание надслойных горючих газов в топках. Таллин, Эстгосиздат, 1958.
3. Палатник И. Б., Темирбаев Д. Ж. Закономерности распространения осесимметричной воздушной струи в сносящем однородном потоке. В сб. Проблемы теплоэнергетики и прикладной теплофизики, вып. 4. Алма-Ата, «Наука», 1967.
4. Keffer J. F., Baines W. D. The round turbulent jet in a cross-wind. J. Fluid Mech., 1963, vol. 15, No 4.
5. Процессы переноса в турбулентных течениях со сдвигом. Таллин, АН ЭССР, 1973.
6. Кашафутдинов С. Т. Возмущения давления на плоской поверхности, обусловленные истечением из нее газовой струи в дозвуковой сносящий поток. Изв. СО АН СССР, 1971, № 8, Сер. техн. н., вып. 2.
7. Кашафутдинов С. Т. Об особенностях турбулентного смешения круглой струи с поперечным несжимаемым потоком. Изв. СО АН СССР, 1971, № 13, Сер. техн. н., вып. 3.
8. Bradbury L. J., Wood M. N. The static pressure distribution around a circular jet exhausting normal from a plane wall into an airstream. Aeronaut. Res. Council, Current Papers, 1968, No 822.
9. Кашафутдинов С. Т. Влияние поперечного потока на истечение из осесимметричного сопла. Изв. СО АН СССР, 1974, № 13, Сер. техн. н., вып. 3.

УДК 532.525.2:534.322.3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ШУМА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРУИ

А. Н. АНТОНОВ, М. С. СЛАДКЕВИЧ

(Москва)

При истечении сверхзвуковой струи в спектре шума, излучаемого струей, может появиться дискретный тон определенной частоты, значительно превышающий спектральный уровень на соседних частотах. Впервые этот эффект описан в [1]. Долгое время считалось, что дискретный тон излучается только холодными струями. В [2] дается физическое объяснение отсутствия дискретного тона у горячих струй. Однако в последнее время появился ряд экспериментальных работ, в которых показано, что дискретный тон может существовать и у струй высокой температуры [3-5].

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального исследования влияния температуры газа и скорости спутного потока на частоту и уровень дискретной составляющей в спектре шума сверхзвуковой струи. На основе результатов [1] предполагается зависимость, позволяющая рассчитывать частоту дискретного тона при высокой температуре газа и наличии спутного потока.

1. Эксперименты проводились с охлаждаемыми водой сверхзвуковыми коническими и профилированными соплами, параметры которых приведены ниже:

№	1	2	3	4	5
M_a	2.56	2.28	2.4	3.53	3.2
d_a , мм	60	44	47	37	102.3
d_s , мм	35	30	30	14	45.3
θ , град	12	0	8	18	10