

УДК 621.793

Газодинамика сверхзвуковой радиальной струи^{*} Часть II

В.Ф. Косарев, С.В. Клинков, В.Н. Зайковский

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

E-mail: vkos@itam.nsc.ru

Проведено сравнение радиальных распределений измеренного трубкой Пито давления в радиальной струе для случаев без закрутки и с закруткой потока в форкамере, определена длина сверхзвуковой части струи, получены зависимости толщины струи от расстояния от среза сопла и ее аппроксимации аналитической формулой, которая обобщает экспериментальные данные. Исходя из полученных данных, можно заключить, что на дистанциях напыления менее 4–6 калибров скорость и температура частиц будут примерно одинаковы по всему сечению струи. Это означает, что напыляемая поверхность может быть установлена в пределах этой дистанции без потери качества покрытия и коэффициента напыления. В качестве максимальной дистанции, на которой еще можно ожидать напыления, рекомендовано принять величину, равную длине $l_{s0} \sim 16$ калибров.

Ключевые слова: сверхзвуковая радиальная струя, холодное газодинамическое напыление, профиль давления.

Введение

Одним из путей нанесения покрытий методом холодного газодинамического напыления (ХГН) [1] на внутреннюю поверхность цилиндрических труб, в первую очередь диаметром менее 100 мм, является применение радиального сверхзвукового сопла [2], что стимулирует проведение исследований газодинамики течений, генерируемых такими соплами. В первой части работы (см. [3]) было дано описание экспериментальной установки и приведены результаты визуализации и профили измеренного на различных расстояниях от среза сопла трубкой Пито давления для случаев незакрученной и закрученной сверхзвуковой радиальной струи при ее истечении в затопленное пространство с атмосферным давлением и натекании на преграду. В процессе исследований варьировались ширина сверхзвуковой части сопла ($\delta_{ex} = 0,5\text{--}2$ мм) и давление в форкамере сопла ($p_0 = 1,0\text{--}2,5$ МПа). Показано, что при закрутке потока в форкамере визуальная структура закрученной струи качественно совпадает со структурой незакрученной струи.

Во второй части работы, являющейся продолжением [3], представлены результаты обработки полученных экспериментальных данных. По радиальным распределениям измеренного трубкой Пито давления в струях, истекающих из сопел различной ширины, определена длина сверхзвуковой части струи. Также получена аппроксимация зависимости толщины струи от расстояния от среза сопла аналитической формулой, которая при правильном подборе параметров обобщает экспериментальные данные. Это позволяет

^{*} Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 14-01-00352-а и 15-08-04129-а).

прогнозировать характерный диапазон внутренних диаметров труб, на которые могут быть нанесены покрытия одним напылительным узлом.

Длина сверхзвукового участка радиальной струи

Применительно к условиям ХГН важно оценить длину сверхзвукового участка радиальной струи. Эта длина характеризует дистанцию, в пределах которой должна устанавливаться напыляемая поверхность. Превышение этой длины нецелесообразно, поскольку частицы начинают терять скорость, что ведет к ухудшению качества покрытия, коэффициента напыления и т.д. В нашем случае напыляемая поверхность представляет собой внутреннюю поверхность трубы, следовательно, сверхзвуковой участок радиальной струи определяет максимальный внутренний диаметр трубы.

Оценка длины сверхзвукового участка радиальных струй проводилась с использованием предварительно полученных с помощью трубки Пито радиальных распределений давлений для разных ширин сопла ($\delta_{ex} = 0,5-2$ мм) и давлений в форкамере ($p_0 = 1,0-2,5$ МПа) по следующей процедуре. Известно [4], что в дозвуковом потоке трубка Пито измеряет полное давление. В то же время выравнивание статического давления с атмосферным (при истечении в среду с атмосферным давлением, как это часто происходит в условиях ХГН) в сверхзвуковых струях (по крайней мере, истекающих из сопел шириной 1–3 мм) происходит раньше, чем сверхзвуковое течение переходит в дозвуковое. Это позволяет определить длину сверхзвукового участка струи по измерениям, полученным с помощью трубки Пито. Расстояние, на котором трубка Пито измеряет давление, равное $p_a (1 + (\gamma - 1)/2)^{\gamma/(\gamma - 1)}$ (примерно составляющее 0,189 МПа для воздуха при истечении в среду с атмосферным давлением p_a), соответствует числу Маха, равному 1. На рис. 1 в качестве примера показаны радиальные распределения измеренного трубкой Пито

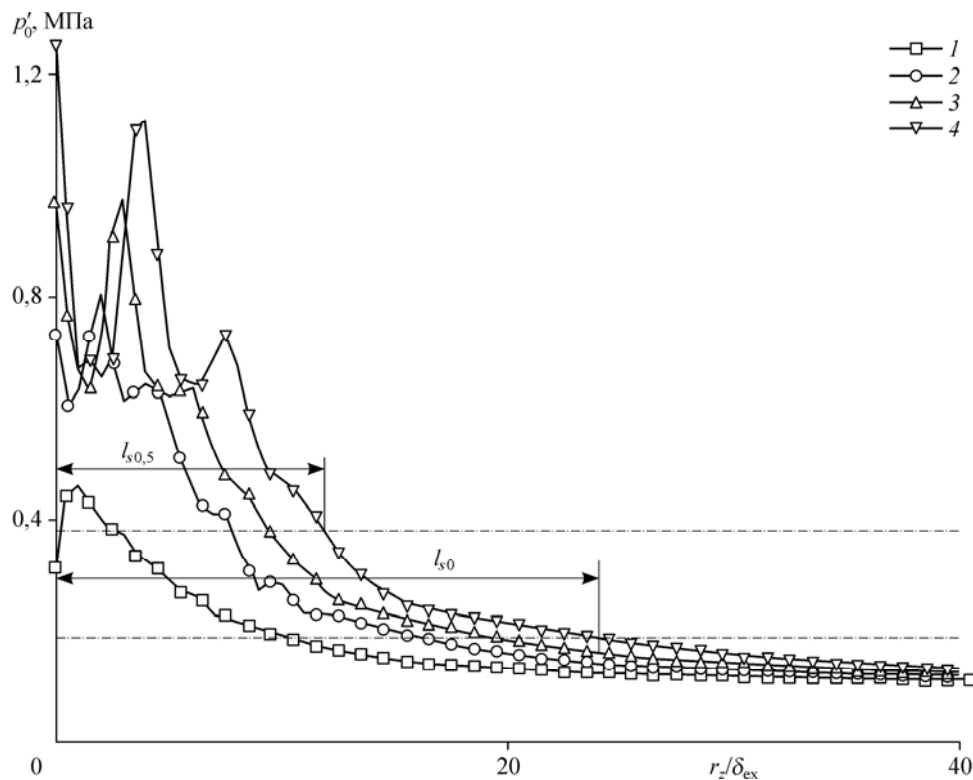
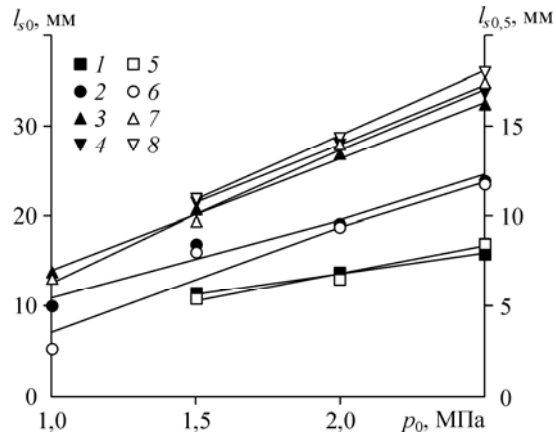


Рис. 1. Радиальное распределение измеренного трубкой Пито давления при различных давлениях в форкамере. $\delta_{ex} = 1$ мм; $p_0 = 1$ (1), 1,5 (2), 2 (3), 2,5 (4) МПа.

Рис. 2. Зависимость длины сверхзвукового участка струи от давления в форкамере и ширины канала сверхзвуковой части сопла.

$\delta_{\text{ex}} = 0,5$ (1, 5), 1 (2, 6), 1,5 (3, 7), 2 (4, 8) мм;
темные символы соответствуют l_{s0} ,
светлые — $l_{s0,5}$.



давления p'_0 в зависимости от давлений в форкамере для сопла с $\delta_{\text{ex}} = 1$ мм. Расстояние l_{s0} от среза сопла, на котором пунктирная линия, соответствующая величине 0,189 МПа, пересекает графики измеренного трубкой Пито давления, определяет длину сверхзвукового участка на осевой плоскости струи. Может быть предложена также оценка длины сверхзвукового участка расстоянием, на котором сверхзвуковые скорости реализуются внутри области, где давление p'_0 составляет более половины от давления p'_0 на осевой плоскости. Условие, что число Маха равно 1 на границе этой области, определяет расстояние $l_{s0,5}$, на котором пунктирная линия, соответствующая величине 0,378 МПа, пересекает графики измеренного трубкой Пито давления p'_0 . Зависимости l_{s0} и $l_{s0,5}$ представлены на рис. 2. Видно, что l_{s0} и $l_{s0,5}$ (в исследованном диапазоне p_0) растут практически линейно с увеличением давления торможения и $l_{s0} \approx 2l_{s0,5}$. Кроме того, как и следовало ожидать, длина сверхзвукового участка радиальной струи уменьшается с уменьшением ширины сопла.

Сравнение закрученной и незакрученной струй

На рис. 3 сопоставлены типичные радиальные распределения p'_0/p_0 для закрученного и незакрученного течений. Следует отметить, что при измерении трубкой Пито коррекции по углу не производилось. Это оправдано тем, что на фотографиях не было отмечено существенного отклонения направления потока от радиального при закрутке в форкамере сопла. Причины этого заключаются в следующем. Во-первых, из закона сохранения циркуляции скорости следует, что тангенциальная скорость на выходе в 4 раза ниже, чем в критическом сечении. Учитывая, что радиальная скорость на выходе примерно в 2 раза выше критической величины, получается, что угол отклонения линий тока от радиального направления на выходе сопла примерно в 8 раз меньше, чем в критическом

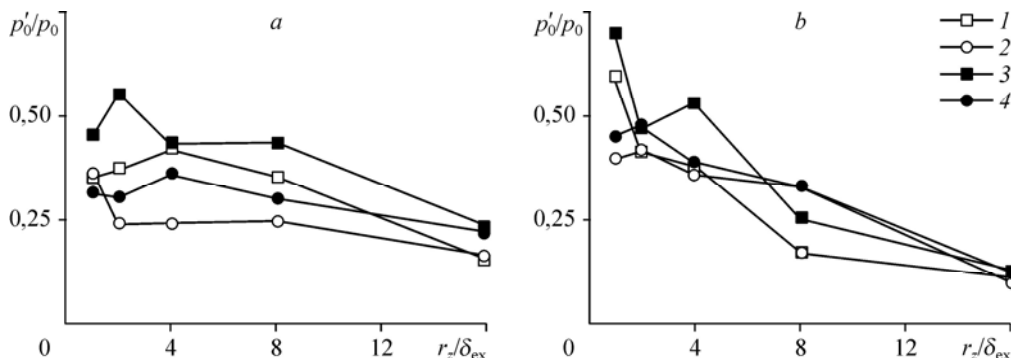


Рис. 3. Радиальные распределения p'_0/p_0 для незакрученного (1, 2) и закрученного (3, 4) течений.

$\delta_{\text{ex}} = 0,5$ (a), 2 (b) мм; $p_0 = 1,5$ (1, 3), 2,5 (2, 4) МПа.

сечении. Даже если принять, что тангенциальная скорость в критическом сечении порядка критической (т.е. начальный угол примерно 45°), то на выходе угол окажется примерно 5° . Во-вторых, из-за вязкости окружная скорость газа уменьшается еще больше, что и приводит к практически радиальному истечению.

Таким образом, можно отметить, что закрутка не приводит к существенным отличиям в распределении p'_0/p_0 . Следовательно, полученные выше оценки длин сверхзвукового участка для радиальных струй без закрутки (l_{s0} и $l_{s0,5}$) применимы и для радиальных струй с закруткой потока в форкамере.

Радиальная зависимость толщины струи

Толщина струи также является важной характеристикой для ХГН. Заметим, что при ХГН, как правило, используется подогретая до $200\text{--}400^\circ\text{C}$ струя. Необходимо знать начальную дистанцию от среза сопла, на которой радиальная струя имеет примерно одинаковую толщину. На этом начальном участке струи скорость и температура частиц будут примерно одинаковы по сечению струи. Расширение струи означает образование слоя смешения с атмосферным воздухом, в котором скорость и температура газа падают, что приводит также к падению скорости и температуры частиц по сечению и, как следствие, снижению коэффициента напыления, ухудшению адгезии и другим побочным явлениям, отрицательно влияющим на качество покрытия.

Толщина струи определялась как расстояние между двумя точками, расположенными на границах струи, в которых величина отношения p'_0/p_0 составляла определенный процент от максимального значения. Для примера на рис. 4 приведены изолинии, соответствующие диапазону $5\text{--}50\%$ в радиальной струе, истекающей из сопла шириной 1 мм при давлении в форкамере $1,5\text{ МПа}$. Отметим, что на рис. 4 и далее приведена общая толщина струи. Поскольку струя расширяется симметрично в две стороны, то реальная граница струи в одну из ее сторон будет в 2 раза меньше.

Границе ядра струи, согласно данному выше определению, соответствует уровень 50% и, согласно рис. 2, сверхзвуковые скорости будут на границе ядра струи (для сопла шириной 1 мм) примерно на дистанции восьмикратной ширины сопла. Если оценивать всю толщину струи по уровню 5% , то на этом расстоянии, как видно из рис. 4, ядро струи занимает примерно 50% от всей толщины струи. Поскольку распределение частиц

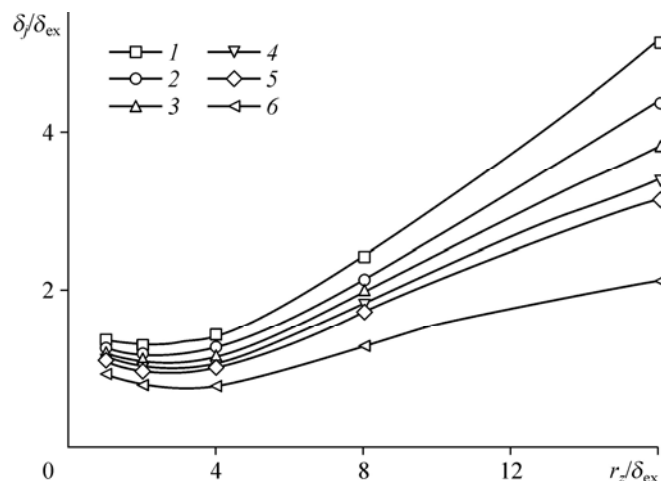


Рис. 4. Зависимость толщины радиальной струи от расстояния от среза сопла. $\delta_{ex} = 1\text{ мм}$, $p_0 = 1,5\text{ МПа}$; 5 (1), 10 (2), 15 (3), 20 (4), 25 (5), 50 (6) %.

по толщине струи близко к нормальному [1], то в ядре струи в этом случае оказывается около 80 % частиц. Из рис. 4 видно, что примерно до 4-х калибров толщина струи меняется незначительно, основное расширение (причем почти линейное) начинается от 4-х калибров и далее. Подобные кривые наблюдаются во всех случаях, кроме одного (см. далее).

На рис. 5 представлены данные зависимости толщины струи от давления в форкамере и ширины канала сопла (по 50-процентной оценке). Здесь же представлены аппроксимации аналитической формулой вида

$$\bar{\delta}_j(\bar{r}_z) = \begin{cases} \bar{\delta}_{j0} \left(1 + (2^4 - 1) \left(\frac{\bar{r}_z - \bar{r}_{z0}}{\bar{r}_{z2} - \bar{r}_{z0}} \right)^4 \right)^{1/4}, & \text{при } \bar{r}_z - \bar{r}_{z0} \geq 0, \\ \bar{\delta}_{j0}, & \text{при } \bar{r}_z - \bar{r}_{z0} < 0. \end{cases} \quad (1)$$

Все величины нормированы на ширину канала сверхзвуковой части сопла:

$$\bar{\delta}_j = \delta_j / \delta_{\text{ex}}, \quad \bar{\delta}_{j0} = \delta_{j0} / \delta_{\text{ex}}, \quad \bar{r}_z = r_z / \delta_{\text{ex}}, \quad \bar{r}_{z0} = r_{z0} / \delta_{\text{ex}}, \quad \bar{r}_{z2} = r_{z2} / \delta_{\text{ex}}.$$

Начиная с некоторого расстояния $2(\bar{r}_z - \bar{r}_{z0}) / (\bar{r}_{z2} - \bar{r}_{z0}) > 1$, кривая (1) приближается к асимптоте

$$\bar{\delta}_j(\bar{r}_z) = 2\bar{\delta}_{j0}(\bar{r}_z - \bar{r}_{z0}) / (\bar{r}_{z2} - \bar{r}_{z0}). \quad (2)$$

Физический смысл параметров $\bar{\delta}_{j0}$, \bar{r}_{z2} и \bar{r}_{z0} состоит в следующем. Коэффициент $\bar{\delta}_{j0}$ представляет собой среднюю толщину струи на расстоянии от 0 до 4 калибров. Из рис. 4 видно, что именно на этом расстоянии наблюдается наименьший разброс данных

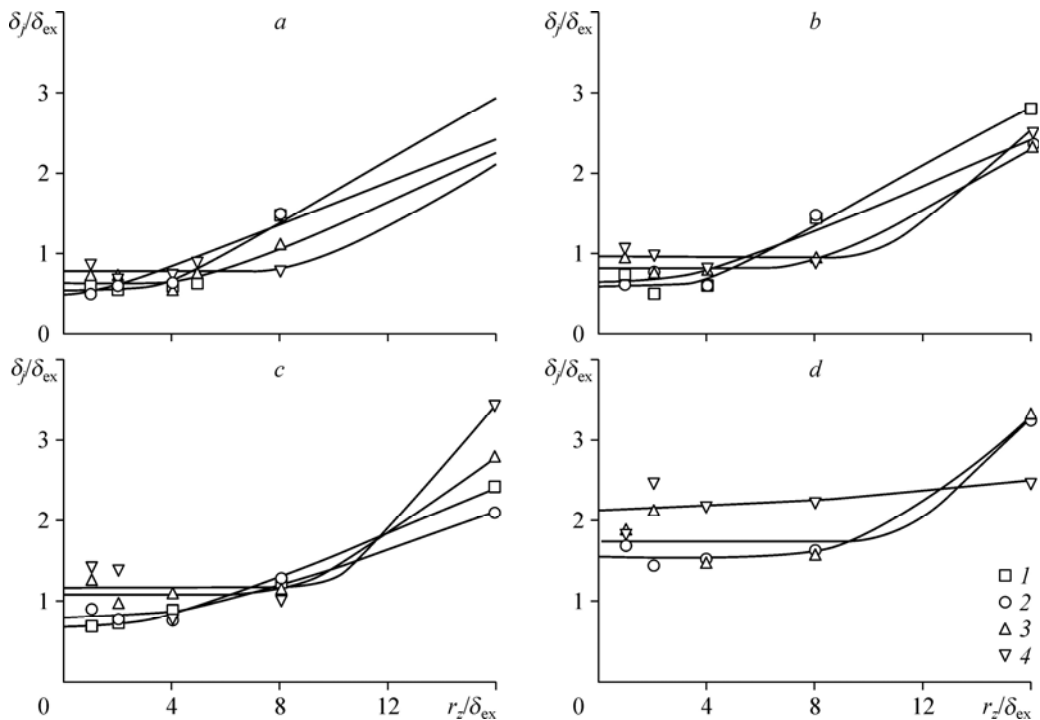


Рис. 5. Зависимость толщины радиальной струи от расстояния от среза сопла при разных давлениях в форкамере.

$\delta_{\text{ex}} = 2$ (a), 1,5 (b), 1 (c), 0,5 (d) мм; $p_0 = 1$ (1), 1,5 (2), 2 (3), 2,5 (4).

в зависимости от давления в форкамере (кроме одного случая, когда $\delta_{ex} = 0,5$ мм, $p_0 = 2,5$ МПа). Величина \bar{r}_{z2} обозначает расстояние, на котором струя расширяется в 2 раза по сравнению с начальной величиной δ_{j0} . Величина \bar{r}_{z0} обозначает так называемый “полюс” — точку, из которой начинается линейное расширение струи. Величины $\bar{\delta}_{j0}$, \bar{r}_{z0} и \bar{r}_{z2} определялись из условия минимума функции (квадратичной ошибки аппроксимации)

$$f(\bar{\delta}_{j0}, \bar{r}_{z0}, \bar{r}_{z2}) = \sum_{i=1}^5 [\bar{\delta}_{ji} - \bar{\delta}_j(\bar{r}_{zi})]^2. \quad (3)$$

Необходимо отметить, что существенное отличие наблюдается только при $\delta_{ex} = 0,5$ мм, $p_0 = 2,5$ МПа. В этом случае струя очень сильно расширяется сразу после выхода из сопла (более чем в 2 раза!), но далее расширение струи оказывается заметно меньше, чем в большинстве случаев. Это, по-видимому, связано с высокой степенью нерасчетности (именно этому случаю соответствует нерасчетность около 1,5).

На рис. 6 представлены данные в обобщенном виде и показана предложенная аналитическая аппроксимирующая формула при параметрах $\bar{\delta}_{j0}$, \bar{r}_{z0} и \bar{r}_{z2} , полученных при минимизации соотношения (3) (см. таблицу). По оси абсцисс отложена координата, определяемая как $\xi_r = (\bar{r}_z - \bar{r}_{z0}) / (\bar{r}_{z2} - \bar{r}_{z0})$.

На рис. 7 показаны зависимости толщины струи $\bar{\delta}_{j0}$ от давления в форкамере для разных δ_{ex} и их линейные аппроксимации. Видно, что $\bar{\delta}_{j0}$ растет с увеличением давления и уменьшением ширины канала сверхзвуковой части сопла. Параметры \bar{r}_{z2} и \bar{r}_{z0} (см. таблицу) тоже растут как с увеличением давления p_0 , так и с уменьшением δ_{ex} . Более высокое значение толщины струи для сопла 0,5 мм может быть объяснено более высокой степенью нерасчетности.

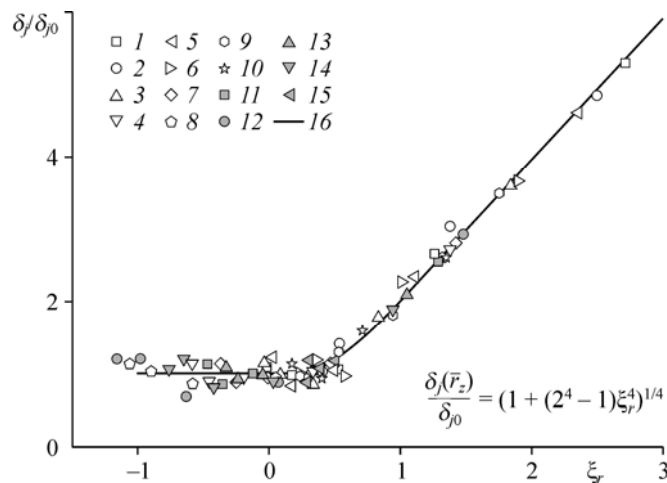


Рис. 6. Обобщенная зависимость толщины радиальной струи от расстояния от среза сопла.

- 1 — $\delta_{ex} = 2,0$ мм, $p_0 = 1,0$ МПа, 2 — $\delta_{ex} = 2,0$ мм, $p_0 = 1,5$ МПа, 3 — $\delta_{ex} = 2,0$ мм, $p_0 = 2,0$ МПа,
- 4 — $\delta_{ex} = 2,0$ мм, $p_0 = 2,5$ МПа, 5 — $\delta_{ex} = 1,5$ мм, $p_0 = 1,0$ МПа, 6 — $\delta_{ex} = 1,5$ мм, $p_0 = 1,5$ МПа,
- 7 — $\delta_{ex} = 1,5$ мм, $p_0 = 2,0$ МПа, 8 — $\delta_{ex} = 1,5$ мм, $p_0 = 2,5$ МПа, 9 — $\delta_{ex} = 1,0$ мм, $p_0 = 1,0$ МПа,
- 10 — $\delta_{ex} = 1,0$ мм, $p_0 = 1,5$ МПа, 11 — $\delta_{ex} = 1,0$ мм, $p_0 = 2,0$ МПа, 12 — $\delta_{ex} = 1,0$ мм, $p_0 = 2,5$ МПа,
- 13 — $\delta_{ex} = 0,5$ мм, $p_0 = 1,5$ МПа, 14 — $\delta_{ex} = 0,5$ мм, $p_0 = 2,0$ МПа, 15 — $\delta_{ex} = 0,5$ мм, $p_0 = 2,5$ МПа,
- 16 — аппроксимация.

Таблица

		Параметры аппроксимации			
		p_0 , МПа			
δ_{ex} , мм	Параметры	1,0	1,5	2,0	2,5
2,0	$\bar{\delta}_{j0}$	0,547	0,493	0,614	0,719
	\bar{r}_{z2}	6,546	5,269	9,252	12,274
	\bar{r}_{z0}	1,045	-1,861	1,298	4,781
1,5	$\bar{\delta}_{j0}$	0,609	0,646	0,787	0,854
	\bar{r}_{z2}	7,241	7,873	12,166	12,425
	\bar{r}_{z0}	0,818	-1,161	4,415	5,278
1,0	$\bar{\delta}_{j0}$	0,692	0,804	1,046	0,859
	\bar{r}_{z2}	8,537	11,607	13,07	10,685
	\bar{r}_{z0}	-1,252	-1,269	4,732	5,554
0,5	$\bar{\delta}_{j0}$		1,507	1,52	2,081
	\bar{r}_{z2}		15,131	15,229	49,289
	\bar{r}_{z0}		4,941	6,477	-19,116

Интересно сравнить расширение радиальной струи с расширением струи, истекающей из сопла прямоугольного сечения, при близких величинах ширин сопла и давления в форкамере. Как было отмечено в работе [3], струи, истекающие из радиальных сопел, отличаются от струй, истекающих из одиночных сопел, тем, что при выходе из сопла продолжают расширяться в том смысле, что с увеличением дистанции от среза сопла увеличивается как их поперечная площадь, так и боковая (следовательно, и площадь смешения с окружающим воздухом). Эта особенность должна приводить, во-первых, к отсутствию режима расчетного истечения, во-вторых, к более интенсивному смешению с окружающим воздухом, и, следовательно, более короткому начальному участку. На рис. 8 представлены зависимости 50-процентной толщины струи от расстояния от среза сопла в относительных координатах для радиальной струи, истекающей из сопла

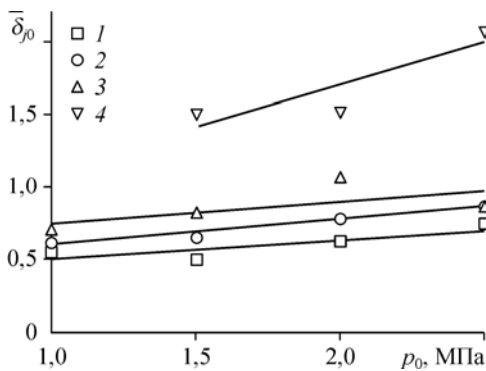


Рис. 7. Зависимость средней толщины струи на расстоянии от 0 до 4 калибров от давления в форкамере. $\delta_{\text{ex}} = 2$ (1), 1,5 (2), 1 (3), 0,5 (4).

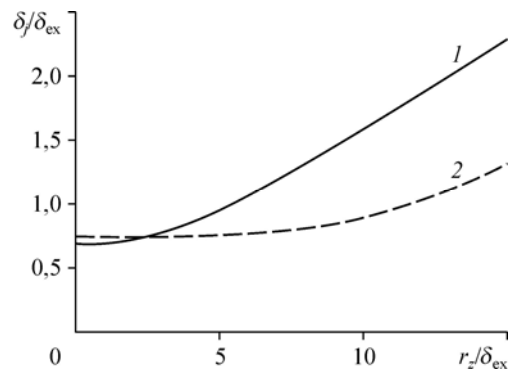


Рис. 8. Зависимость 50-процентной толщины струи от расстояния от среза сопла в относительных координатах для радиальной струи ($\delta_{\text{ex}} = 1$ мм, $p_0 = 1$ МПа) (1) и струи, истекающей из сопла прямоугольного сечения ($\delta_{\text{ex}} = 1$ мм) на расчетном режиме ($p_0 = 0,7$ МПа) (2) [1].

шириной 1 мм при давлении в форкамере 1 МПа (кривая 1), и струи, истекающей из сопла прямоугольного сечения на расчетном режиме (кривая 2) [1]. Кривая 1 строилась по формуле (2) при $\bar{r}_{z_0} = -1,25$ и $\bar{r}_{z_2} = 8,54$ (см. таблицу), а кривая 2 — по формуле $\bar{\delta}_j(\bar{r}_z) = \bar{\delta}_{j0} \left(1 + 3 \left(\bar{r}_z \delta_{\text{ex}} / z_{0,5}^M \right)^4 \right)^{0,4}$ при $z_{0,5}^M = 15$ мм. Видно, что радиальная струя имеет заметно меньший по длине (примерно в 2 раза) начальный участок, что не противоречит приведенным выше рассуждениям.

Исходя из полученных данных, можно заключить, что на дистанциях напыления менее 4–6 калибров радиальная струя имеет примерно постоянную толщину. Следовательно, скорость и температура частиц будут примерно одинаковы по всему сечению струи, это означает, что напыляемая поверхность может быть установлена в пределах этой дистанции без потери качества покрытия и коэффициента напыления. Вероятнее всего, дистанция напыления может быть расширена до значений $l_{s0,5} \sim 8$ калибров, хотя при этом может наблюдаться некоторое уменьшение коэффициента напыления. В качестве максимальной дистанции, на которой еще можно ожидать напыления, можно принять величину, равную длине $l_{s0} \sim 16$ калибров.

Заключение

В работе проведено сравнение радиальных распределений измеренного трубкой Пито давления в радиальной струе для случаев без закрутки и с закруткой потока в форкамере, определена длина сверхзвуковой части струи, получены зависимости толщины струи от расстояния от среза сопла и ее аппроксимации аналитической формулой, которая обобщает экспериментальные данные. Также показано, что:

- длина сверхзвукового участка радиальной струи на осевой плоскости примерно в 2 раза больше длины сверхзвукового участка ядра струи ($l_{s0} \approx 2l_{s0,5}$), эти длины (в исследованном диапазоне p_0) растут практически линейно с увеличением давления торможения и падают с уменьшением ширины сопла;
- полученные оценки длины сверхзвукового участка для радиальных струй без закрутки (l_{s0} и $l_{s0,5}$) применимы и для радиальных струй с закруткой потока в форкамере;
- проведено сравнение расширения радиальной струи с расширением струи, истекающей из сопла прямоугольного сечения, и показано, что радиальная струя имеет заметно меньший (примерно в 2 раза) по длине начальный участок.

Исходя из полученных данных, можно заключить, что на дистанциях напыления менее 4–6 калибров скорость и температура частиц будут примерно одинаковы по всему сечению струи. Это означает, что напыляемая поверхность может быть установлена в пределах этой дистанции без потери качества покрытия и коэффициента напыления. В качестве максимальной дистанции, на которой еще можно ожидать напыления, можно принять величину, равную длине $l_{s0} \sim 16$ калибров.

Авторы благодарят С.Г. Кундасева и И.Н. Кавун за помощь в проведении экспериментов.

Список обозначений

l_{s0} — длина сверхзвукового участка на осевой плоскости струи,	r_{z2} — расстояние, на котором струя расширяется в два раза по сравнению с начальной величиной,
$l_{s0,5}$ — длина сверхзвукового участка ядра струи,	$\bar{r}_{z2} = r_{z2} / \delta_{\text{ex}}$ — относительное расстояние, на котором струя расширяется в два раза по сравнению с начальной величиной,
M — число Маха,	γ — показатель адиабаты,
P — статическое давление,	
p_a — атмосферное давление,	
p_0 — давление в форкамере,	

p'_0 — давление, измеренное трубкой Пито,	δ_{ex} — ширина канала сверхзвуковой части сопла на выходе,
r_z — радиальная координата, отсчитываемая от среза сопла,	δ_j — толщина струи,
$\bar{r}_z = r_z / \delta_{ex}$ — относительная радиальная координата, отсчитываемая от среза сопла,	$\bar{\delta}_j = \delta_j / \delta_{ex}$ — относительная толщина струи,
r_{z0} — координата точки, из которой начинается линейное расширение струи,	δ_{j0} — средняя толщина струи на расстоянии от 0,5 до 4 калибров,
$\bar{r}_{z0} = r_{z0} / \delta_{ex}$ — относительная координата точки, из которой начинается линейное расширение струи,	$\bar{\delta}_{j0} = \delta_{j0} / \delta_{ex}$ — относительная средняя толщина струи на расстоянии от 0,5 до 4 калибров,
	$\xi_r = \bar{r}_z - \bar{r}_{z0} / \bar{r}_{z2} - \bar{r}_{z0}$ — координата на обобщенном графике.

Список литературы

1. Алхимов А.П., Кликов С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика / Под. ред. В.М. Фомина. М.: Физматлит, 2010. 536 с.
2. Klinkov S., Kosarev V., Zaikovskii V. Cold spray deposition on inner side of pipe with aid of radial supersonic nozzle // 2014 Thermal Spray Conf., May 21 – 23, 2014, Barcelona. Proc., 2014, ASM International. P. 940–945.
3. Косарев В.Ф., Кликов С.В., Зайковский В.Н., Кундасев С.Г. Газодинамика сверхзвуковой радиальной струи. Часть I // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 6. С. 693–703.
4. Абрамович Г.И. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1969. 824 с.

*Статья поступила в редакцию 20 января 2015 г.,
после доработки — 13 марта 2015 г.*