

ТЕЧЕНИЕ ЗАПЫЛЕННОГО ГАЗА В СВЕРХЗВУКОВОМ МИКРОСОПЛЕ: ЭФФЕКТ АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКИ

А.Н. Кудрявцев^{1,2}, А.А. Шершнев^{1,2}

¹*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН
630090, Новосибирск, Россия*

²*Новосибирский государственный университет
630090, Новосибирск, Россия*

Многофазные течения в микросоплах представляют большой интерес из-за их возможных технических приложений. Одним из наиболее перспективных применений является получение высокоскоростных коллимированных пучков микрочастиц, которые могут быть использованы в различных технологиях, в частности в новом методе напыления, известном как CAB-DW (Collimated Aerosol Beam Direct-Write) [1]. В CAB-DW «аэрозольная пушка» используется для нанесения твердых материалов на подложку в процессе производства солнечных батарей и электронных микросхем. Было продемонстрировано, численно и экспериментально [2], что коллимированные пучки могут быть получены с помощью дозвуковых сопел. Сверхзвуковые сопла могли бы облегчить получение более высокоскоростных пучков, однако расходимость линий тока в расширяющейся части сопла делает возможность аэродинамической фокусировки в таких соплах неочевидной.

В настоящей работе численно исследуются двухфазные течения в плоских клиновидных, осесимметричных конических и трехмерных (прямоугольного сечения) сверхзвуковых микросоплах. Типичное осесимметричное сверхзвуковое сопло, использованное в расчете, показано на рис. 1. Это коническое сопло с углом наклона дозвуковой (сужающейся) части 45 градусов, и сверхзвуковой – расширяющейся части – 20 или 15 градусов, со скругленным горлом. Радиус критического сечения сопла $h = 100$ мкм. Расчетная область включала некоторую часть окружающего пространства. Сначала рассчитывалось течение газовой фазы. Для этого уравнения Навье-Стокса с граничными условиями, учитывающими скольжение и скачок температуры на стенках сопла решались одной из современных схем сквозного счета (WENO схема 3-го порядка). Моделирование проводилось при низких числах Рейнольдса. Расчеты выполнялись для одноатомного газа (аргона). При расчете течения запыленного газа частицы вводились в поток в форкамере сопла. Предполагалось, что скорость частиц на входной границе равна 0.9 от скорости газа. Плотность материала частиц была взята равной 2000 кг/м^3 .

Для расчета траекторий частиц дисперсной фазы интегрируются уравнения их движения под действием сил, действующих на них со стороны несущей фазы. При движении частиц их режим обтекания может изменяться в очень широких пределах, включая, особенно для мелких частиц, обширную область свободномолекулярного течения. поэтому особое значение для достоверности результатов численного моделирования приобретает надежность формул, описывающих действующую на частицу силу сопротивления. При проведении расчетов мы использовали интерполяционные зависимости для коэффициента сопротивления C_D , предложенные в [3] верифицированные в ряде статей последних лет для широкого диапазона режимов – от ползущего течения до свободномолекулярного.

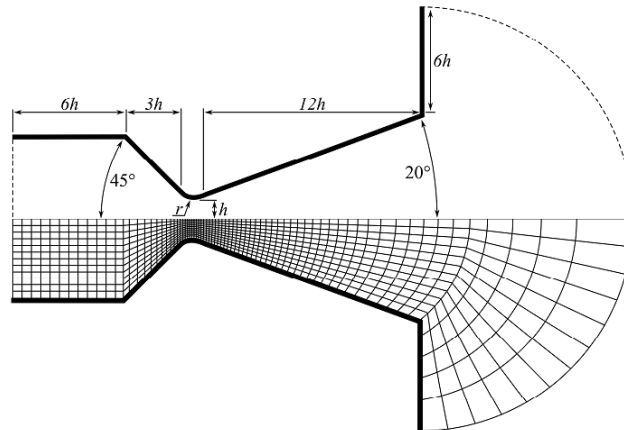
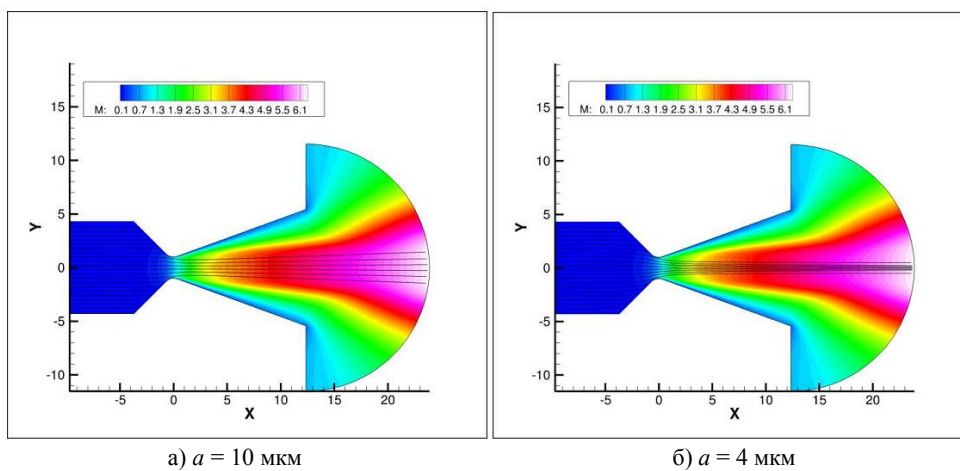


Рис. 1. Схема осесимметричного сверхзвукового сопла и использованная расчетная сетка (показана каждая восьмая линия).

Типичные результаты моделирования динамики частиц в осесимметричном сопле приведены на рис.2. Угол полураствора сопла $\alpha = 20^\circ$, число Рейнольдса, определенное по параметрам в горле сопла $Re = 350$.

Как видно из рисунка, характерной особенностью течения газовой фазы является толстый пограничный слой в сверхзвуковой части сопла. Число Маха на срезе сопла приблизительно 4.7. Из-за большой вязкости не образуется висячий сопловой скачок, характерный для конических и клиновидных сопел.

Как и следовало ожидать, траектории достаточно больших частиц (скажем, с радиусом $a = 10$ мкм, рис. 2а) практически прямолинейны. При уменьшении размера частиц начинает проявляться эффект аэродинамической фокусировки. Он совершенно отчетливо выражен при $a = 3.25$ мкм (рис. 2в), когда траектории на выходной границе сфокусировались практически в точку. Затем на оси появляется точка пересечения траекторий, за которой струя частиц расширяется (рис. 2г-д). Она постепенно сдвигается к горлу сопла.



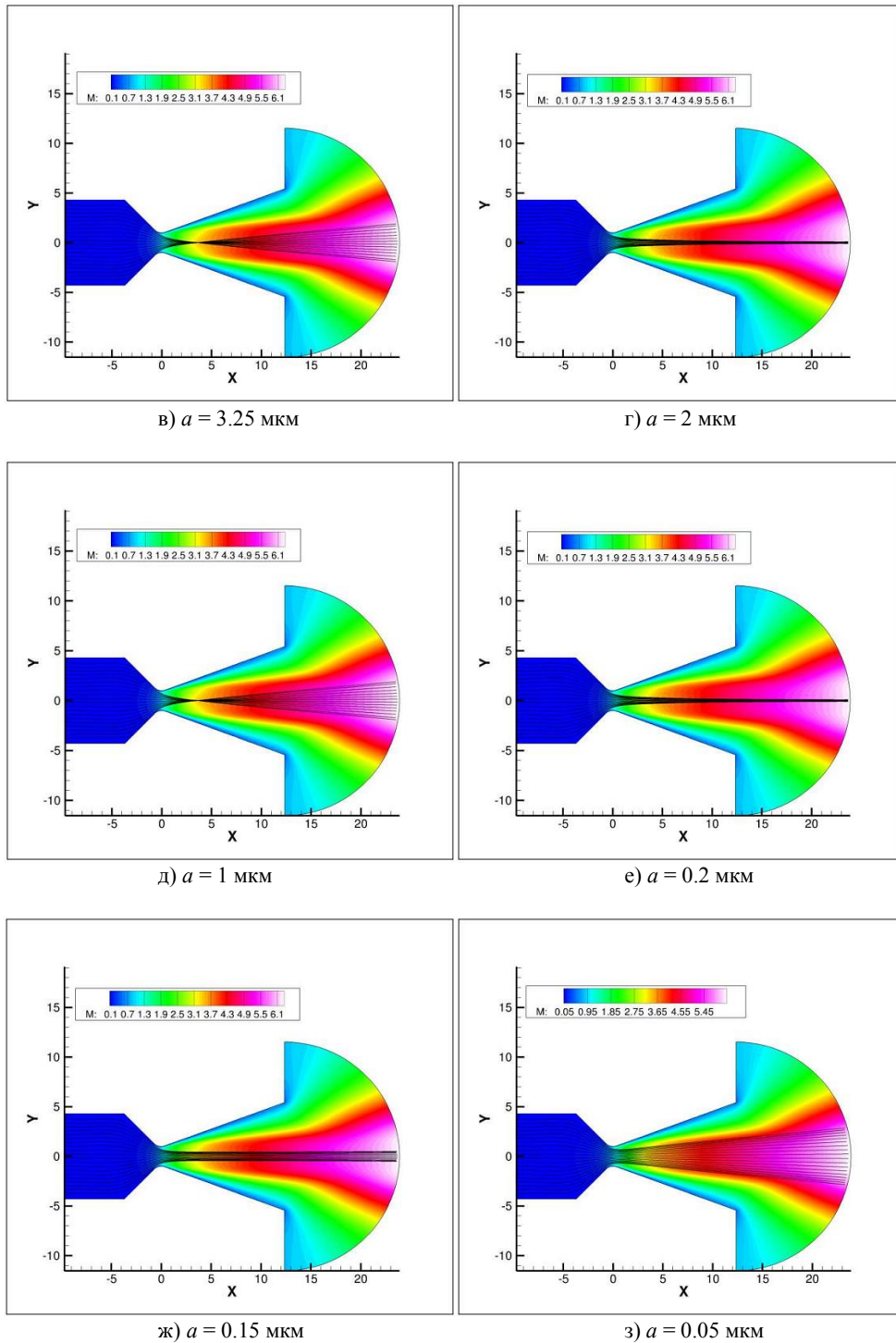


Рис.2. Поле числа Маха газовой фазы и траектории частиц различных размеров в осесимметричном сверхзвуковом микросопле.

Неожиданным явился тот факт, что при дальнейшем уменьшении размера частиц снова возникает фокусировка ($a = 0.2$ мкм, рис. 2е). Теперь частицы уже не пересекают ось и фокусируются не только частицы, запущенные вблизи оси, но практически все частицы, вошедшие в форкамеру. Наконец, пучок совсем мелких частиц не фокусируется и начинает даже расширяться в сверхзвуковой части. Таким образом, формирование коллимированного в обоих поперечных направлениях пучка в осесимметричном сверхзвуковом сопле действительно возможно, причем аэродинамическая фокусировка происходит для частиц двух существенно различных размеров.

Рассмотрим особенности динамики частиц дисперсной фазы в двух диапазонах их размеров, для которых наблюдается фокусировка. На рис. 3 показано изменение продольной скорости газа V и частиц V_p вдоль их траекторий как функции продольной координаты x . Очевидно, что для крупных частиц наблюдается очень большое скоростное неравновесие двух фаз. В сверхзвуковой части сопла частицы значительно отстают от газа. Тем не менее, важно отметить, что скорость частиц продолжает расти и в расширяющейся части (хотя в конце области она примерно в 6 раз меньше скорости несущей фазы). Таким образом, применение сверхзвуковых сопел не только позволяет получить коллимированный пучок частиц, но и дает возможность существенно повысить его скорость по сравнению с дозвуковым (сужающимся) соплом.

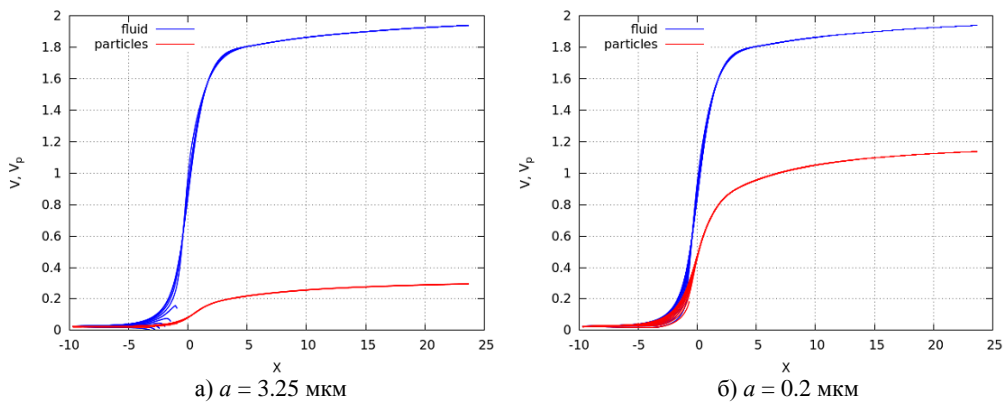


Рис. 3. Изменение продольной скорости газа и скорости дисперсной фазы вдоль траекторий частиц.

Еще более благоприятной является ситуация для мелких частиц. В этом случае скоростное неравновесие значительно уменьшается, и на выходе имеем коллимированный пучок частиц, скорость которого лишь на 40% ниже скорости газовой струи.

На рис. 4-5 показано изменение вдоль траекторий чисел Рейнольдса Re_p и Кнудсена Kn_p относительного движения частиц и газа. Очевидно, что при движении частиц режим их обтекания действительно изменяется в очень широких пределах.

Эффект аэродинамической фокусировки наблюдался также в расчетах, проведенных для плоских сопел и трехмерных сопел прямоугольного сечения. В обоих этих случаях пучок, однако, получался сфокусированным только в одном поперечном направлении. Получить в трехмерном сопле с параллельными боковыми стенками фокусировку в направлении по размаху не удастся. Схождения линий тока в сверхзвуковой части сопла за счет роста толщины пограничного слоя на боковых стенках оказывается недостаточно, чтобы сфокусировать частицы. Это, в частности, связано, со слабым силовым воздействием потока на частицы в расширяющейся части сопла, где плотность газа сильно падает. Можно сделать вывод, что для получения фокусировки частиц в обоих поперечных

направлениях в трехмерном сопле необходимо, чтобы его дозвуковая часть была сходящейся в двух направлениях – примерно как это имеет место в круглом сопле.

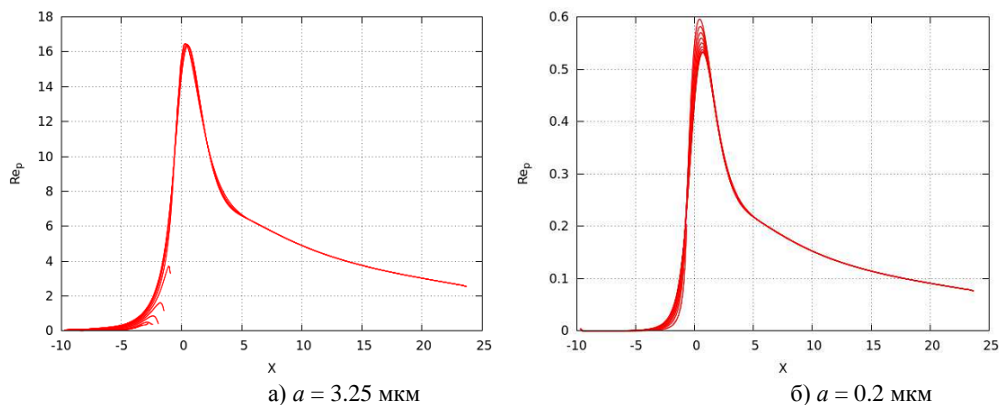


Рис. 4. Изменение числа Рейнольдса относительного движения частиц вдоль их траекторий.

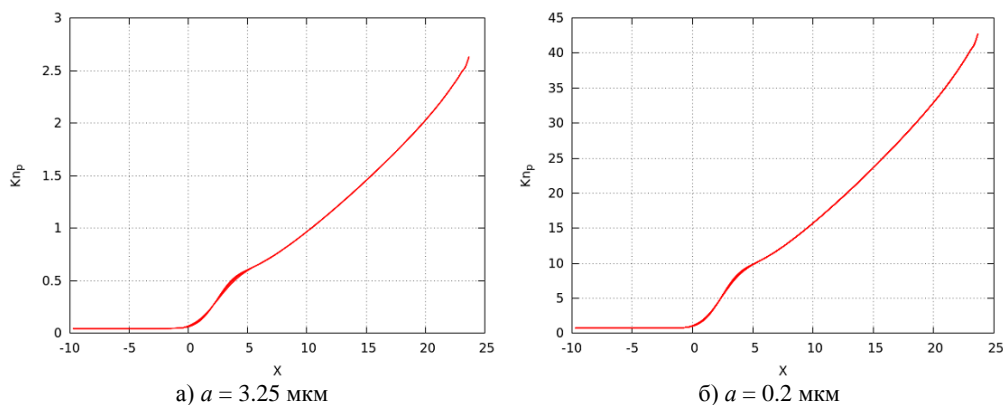


Рис. 5. Изменение числа Кнудсена частиц относительного движения частиц вдоль их траекторий.

Таким образом, установлено, что при выполнении определенных соотношений между размерами частиц и параметрами течения газа в сопле можно получить на выходе из сопла коллимированный пучок частиц. Этот результат может оказаться важным для развития недавно предложенной технологии нанесения металлических покрытий на субстрат при производстве микросхем с помощью аэродинамически сфокусированного пучка микрочастиц; в настоящее время в данной технологии для фокусировки частиц используются только дозвуковые сопла, обеспечивающее существенно меньшую скорость выходящего пучка.

Работа была поддержана грантом Правительства РФ (Договор № 14.Z50.31.0019).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Han S., Dai X., Loy P. et al. Printed silicon as diode and FET materials – preliminary results // J. Non-Crystalline Solids. 2008. Vol. 354. P. 2623-2626.
2. Akhatov I.S., Hoey J.M., Thompson D. et al. Aerosol flow through micro-capillary // ASME 2nd Intern. Conf. on Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer: Proc. Vol. 1. Shanghai, China. P. 223-232.
3. Гилинский М.М., Стаценко А.Л. Сверхзвуковые газодисперсные струи, М.: Машиностроение, 1990.