

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТВЕРДОЙ ПРИМЕСИ
В ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ СОПЛАХ**

В. В. ЗЛОБИН

(Таллин)

Приводятся результаты экспериментального исследования влияния условий входа, крупности твердой примеси (масштаба сопла), профилей до- и трансзвуковой частей сопла и начальной концентрации на распределение дискретной фазы в выходных сечениях осесимметричных сопел. Показано, что профилирование дозвуковой части сопла играет определяющую роль по сравнению с трансзвуковой частью, наибольшее заполнение твердой примесью сечения сверхзвуковых сопел наблюдается при коническом входе. Неравномерность распределения параметров на входе сопла существенно не меняет распределение твердой примеси на выходе.

Расчет расширения двухфазной смеси в сверхзвуковой части сопла методом характеристик [1-3] требует задания начальных данных в окрестности линии Маха, которые могут быть определены расчетом течения в до- и трансзвуковой частях сопла. Сквозной расчет приводится с рядом допущений [4, 6-8], соответствие которых истинным свойствам течения требует экспериментальной проверки. Представляется целесообразным проведение экспериментов с моделированием конденсированной фазы твердой или жидкой примесью, что позволяет глубже понять механизм течения двухфазной смеси в соплах и обеспечивает определенную базу для оценки совершенства методов расчета.

1. Экспериментальная установка. В качестве твердой примеси использовались фракционированные микропорошки, среднemasсовый размер которых составлял 4,5, 6,5, 8,5 и 12,4 мкм, а удельный вес 3,9 т/м³. Дозируемое количество порошка под действием силы тяжести или слабого потока воздуха поступало в магистраль длиной 6 м и диаметром 53 мм, параметры потока в которой обеспечивали на всех режимах качественную транспортировку и диспергирование порошка. Переход от размера 53 мм к диаметру входа сопел 120 и 80 мм осуществлялся посредством конической обечайки с полууглом раствора 4°. Для предотвращения осаждения порошка и создания равномерного распределения параметров на входе сопла устанавливался пакет из труб. Варьирование условий входа осуществлялось заменой пакета центральным телом, закрывавшим половину проходного сечения, или центральной вставкой, превращавшей внутренний канал обечайки в трубу диаметром 81 мм. В дальнейшем эти модификации начального распределения обозначаются как варианты I, II и III соответственно.

Распределение дискретной фазы на выходе сопел измерялось оптическим методом, основанным на зависимости интенсивности рассеянного света от плотности распределения примеси. При монофракционном составе рассеивающей среды имеется пропорциональная зависимость между интенсивностью падающего луча I_0 , плотностью распределения примеси ρ_s и интенсивностью света $I(\beta)$, рассеянного малым объемом среды v под углом β [9]

$$(1.1) \quad I(\beta) \sim I_0 \rho_s v$$

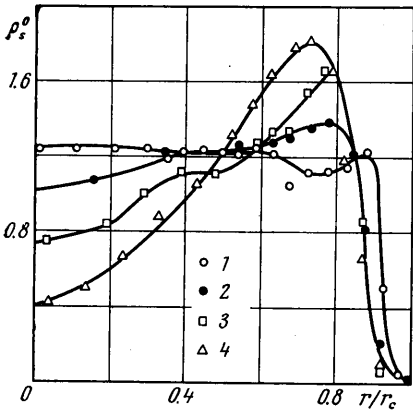
Для исключения коэффициента пропорциональности в (1.1) удобно рассматривать отношение для двух областей потока, тогда

$$(1.2) \quad \frac{\rho_s(x_i, y_i)}{\rho_s(x_k, y_k)} = \frac{I(\beta, x_i, y_i) I_0(x_k, y_k)}{I(\beta, x_k, y_k) I_0(x_i, y_i)}$$

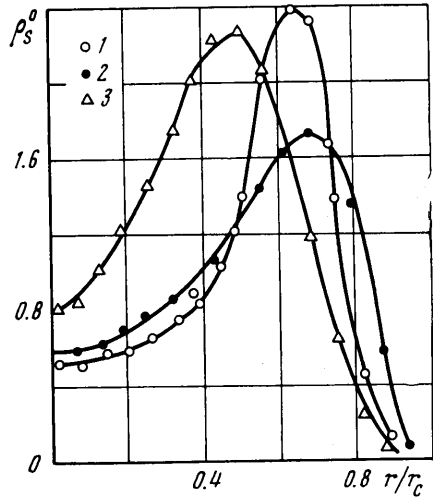
В пределах применимости закона Бугера (в соответствии с данными [10] закон Бугера действителен в определенных случаях до оптических плотностей $\tau=12$) выражение (1.2) записывается через интенсивность рассеянного света $I^*(\beta, x, y)$ вне объема рассеивающей среды

$$(1.3) \quad \frac{\rho_s(x_i, y_i)}{\rho_s(x_k, y_k)} = \frac{I^*(\beta, x_i, y_i) \exp(L_i + L_i')}{I^*(\beta, x_k, y_k) \exp(L_k + L_k')}, \quad L = \int_0^l k(x, y) dl$$

где L, L' — путь ослабления падающего и рассеянного пучков света в объеме рассеивающей среды, $k(x, y)$ — коэффициент ослабления среды.



Фиг. 1



Фиг. 2

Условиям минимального пространственного разрешения и простоты учета ослабления можно удовлетворить для осесимметричных течений при измерении под углом рассеяния $\beta=90^\circ$. Тогда на основании (1.3) можно показать

$$(1.4) \quad \frac{\rho_s(x, 0)}{\rho_s(0, 0)} = \frac{\sqrt{I^*(x, 0)I^*(-x, 0)}}{I^*(0, 0)} \exp\left[\frac{\tau(0) - \tau(x)}{2}\right]$$

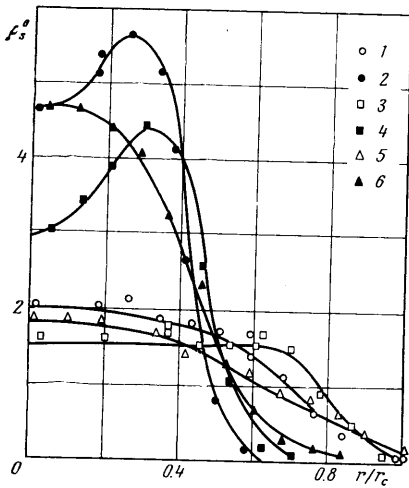
где $\tau(x) = \ln [I_0^* / I_1^*(x)]$.

2. Критерии подобия. На основе анализа системы уравнений в рамках модели, принятой в [1-5], в условиях изотермической задачи и пренебрежимо малого обратного влияния частиц на течение газа можно получить следующий критерий подобия, определяющий распределение частиц при соблюдении геометрического подобия

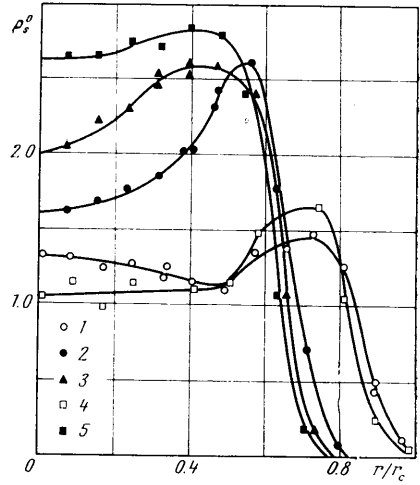
$$(2.1) \quad \eta_1 = 2\rho_p r_p^2 V_0 / 9\mu f_p L_0$$

являющийся отношением времени релаксации частицы к характерному времени течения газа. В (2.1) ρ_p, r_p — плотность и радиус частицы; f_p — отношение коэффициента сопротивления частицы к стоксовскому коэффициенту сопротивления; $L_0, V_0, \rho_0, \rho_{s0}$ — масштабы длины, скорости, плотности газа и плотности распределения примеси соответственно. Критерий подобия, записанный в виде (2.1), неудобен для использования в случае сильно неравновесного течения, так как в него входит коэффициент f_p ,

являющийся функцией режима обтекания частиц. Результаты расчетов и измерений скоростного запаздывания частиц показывают, что в проведенных экспериментах числа Re_p частиц составляют 1–100. В этих пределах можно использовать простую зависимость для коэффициента сопротивления



Фиг. 3



Фиг. 4

ния частиц неизометрической формы $c_p = 19 / \sqrt{Re_p}$ [11], тогда (2.1) приобретает вид

$$(2.2) \quad \eta_1^* = \frac{8\sqrt{2} \rho_p r_p}{57L_0} \sqrt{\frac{r_p V_0}{\rho_0 \mu}}$$

В дальнейшем за масштабы берется длина сопла, скорость и плотность на выходе сопла.

3. Дозвуковые сопла. Эксперименты проведены при расходе воздуха 310–325 г/сек и твердой примеси 3.5–4.3 г/сек. Деформация профилей плотности распределения дискретной фазы на выходе конического сопла в зависимости от крупности примеси при равномерном распределении на входе (вариант I) показана на фиг. 1 (точки соответствуют: 1 — $a_p = 4.5$ мкм и $\eta_1^* = 0.31$, 2 — 6.5 и 0.53, 3 — 8.5 и 0.79, 4 — 12.4 и 1.40; размеры сопла: радиус входа $r = 60$ мм, радиус выхода $r_c = 20.5$ мм, длина сопла $L = 75$ мм). В качестве масштаба ρ_s^0 выбрана средняя по выходному сечению плотность распределения примеси. С увеличением крупности растет степень концентрирования примеси в периферийной области. Неравномерность распределения на входе не изменяет характера распределения примеси, но величина максимума несколько возрастает; варианты начального распределения II и III оказались практически равноценными.

Влияние кривизны профиля сопла можно видеть на фиг. 2, где представлены профили плотности распределения примеси в выходных сечениях выпуклого, конического и вогнутого сопл (точки 1, 2, 3 соответственно) при крупности примеси $a_p = 12.4$ мкм. Основные размеры сопл: $r = 60$ мм, $r_c = 16$ мм, $L = 69$ мм для всех сопл, а радиус кривизны профиля R 1 — 63.5, 2 — ∞ , 3 — 80 мм соответственно. Из этих трех типов сопл коническое сопло создает одинаковую с выпуклым неравномерность профиля плотности распределения и максимальную заполненность выходного сечения.

Максимальную неравномерность распределения примеси создает вогнутое сопло.

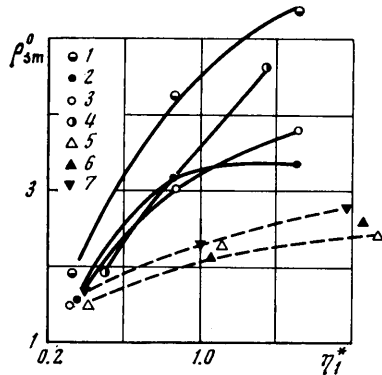
Приведенные данные показывают, что в конфузорных соплах профилированием и масштабом сопла и в определенной степени условиями входа можно эффективно управлять распределением дискретной фазы.

4. Сверхзвуковые сопла. Эксперименты проведены при расходе воздуха 210 г/сек и твердой примеси 3,5 ÷ ÷ 4,3 г/сек. Профили плотности распределения примеси ρ_{3m}^0 на выходе сверхзвуковых сопел при равномерном начальном распределении и крупности примеси 4,5 и 12,4 мкм показаны на фиг. 3. Параметром кривых фиг. 3 является кривизна профиля дозвуковой части сопла (точки 1 и 2, 3 и 4, 5 и 6 соответствуют выпуклому, коническому и вогнутому профилю дозвуковой части с радиусом входа $r=60$ мм и радиусом кривизны $R=63,5, \infty, -110$ мм соответственно;

кроме того, точки соответствуют: 1, 3 — $a_p=4,5$ мкм и $\eta_1^*=0,33$; 2, 4 — 12,4 и 1,51; 5 — 4,5 и 0,29; 6 — 12,4 и 1,34). Первые два сопла имеют идентичные трансзвуковые части (радиус кривизны профиля трансзвуковой части $R_*=40,4$ мм, радиус критического сечения $r_*=10,1$ мм), а третье — более плавную, но как будет ясно из дальнейшего, это обстоятельство не играет, по-видимому, значительной роли. С увеличением крупности примеси все большая часть ее сосредоточивается в присоевой зоне сопла, растет прослойка чистого газа на периферии и при крупности 12,4 мкм примерно $\frac{3}{4}$ выходного сечения сопла свободно от дискретной фазы. Максимально заполненный профиль плотности распределения примеси создает сопло с конической входной частью.

Профили плотности распределения примеси для сопел с коническим входом ($r=40$ мм, угол конусоного 45°), различающиеся трансзвуковыми частями, при крупности примеси 4,5 (точки 1, 4) и 12,4 мкм показаны на фиг. 4. Параметром кривых фиг. 4 является отношение радиуса критического сечения к радиусу трансзвуковой части (точки 1 и 2, 3, 4 и 5 соответствуют отношению $R_*/r_*=2, 4$ и 6, $L=81,2, 85,5$ и $88,4$ мм и $r_*=10,1$ мм; кроме того, 1 — $a_p=4,5$ мкм и $\eta_1^*=0,42$, 2 — 12,4 и 1,94, 3 — 12,4 и 1,81, 4 — 4,5 и 0,39, 5 — 12,4 и 1,78 соответственно). Анализ данных фиг. 4 приводит к выводу, что более плавная форма трансзвуковой части способствует концентрированию дискретной фазы в присоевой части сопла. Этот результат является несколько неожиданным и заслуживает более подробного обсуждения. В трансзвуковой части сопла поперечная скорость газа по величине близка к нулю и, кроме того, меняет знак, поэтому поперечное движение частиц при умеренных значениях отношения R_*/r_* осуществляется за счет кинетической энергии, которую они приобрели в дозвуковой части сопла. При равенстве последнего фактора основное значение имеет длина трансзвуковой части сопла, которая увеличивается с ростом отношения R_*/r_* . Следовательно, предыстория движения частиц, определяемая формой дозвуковой части, а не форма трансзвуковой части сама по себе, играет решающую роль в распределении частиц. Длина трансзвуковой части имеет большее значение для степени неравномерности течения.

Отметим также, что данные фиг. 1—4 находятся в качественном согласии с результатами расчетов [4], в соответствии с которыми максимум



Фиг. 5

плотности распределения примеси формируется в дозвуковой части на периферии сопла и сохраняется при дальнейшем течении вдоль сопла.

Способность сопла концентрировать дискретную фазу в определенной зоне выходного сечения оценена параметром ρ_{sm}° — отношением максимальной плотности распределения примеси к средней по сечению. Параметр ρ_{sm}° отражает влияние двух факторов — степени заполнения выходного сечения дискретной фазой и неравномерности профиля распределения дискретной фазы. На фиг. 5 представлена зависимость ρ_{sm}° от параметра η_1^* для сверхзвуковых сопел типа сопла Лавалья. Параметром кривых является форма сопла (точки 1, 3, 4 относятся к соплам (фиг. 3) с вогнутым, коническим и выпуклым входом, вариант I, а точка 2 — к соплу с коническим входом, вариант II; точки 5, 6, 7 — к соплам (фиг. 4) с $R^*/r^*=2, 4, 6$ соответственно, вариант III). При прочих равных параметрах максимальную концентрацию дискретной фазы в присоединенной зоне сопла создает сопло с вогнутым входом (точка 1), а минимальную — сопло с коническим входом (точки 2 и 3). Все данные, относящиеся к соплам с входом 120 мм (точки 1—4), лежат значительно выше данных для сопел с входом 80 мм (точки 5—7). Таким образом, уменьшением размера входа можно в большой степени управлять степенью заполнения дискретной фазой сечения сопла.

В ранее рассмотренных экспериментах величина начальной расходной массовой концентрации твердой примеси κ не превышала 0.016 кг/кг. При столь малых концентрациях обратное влияние дискретной фазы на течение газа мало и не принималось во внимание при анализе экспериментальных данных. Реальные установки работают при более высоких значениях κ и представляло интерес выяснить, каким образом может влиять увеличение κ на распределение дискретной фазы. Для сопел (фиг. 3) с вогнутым и коническим входом была выполнены продувки при $\kappa=0.16$ кг/кг. В обоих случаях несколько возросло максимальное значение ρ_{sm}° и уменьшилась степень заполнения дискретной фазой выходного сечения сопла.

Поступила 10 VII 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Клигелъ Д., Пикерсон Г. Течение смеси газа и твердых частиц в осесимметричном сопле. В сб. «Детонация и двухфазное течение». М., «Мир», 1966.
2. Клигелъ Д. Течение смеси газа с частицами в сопле. *Вопр. ракетн. техн.*, 1965, № 10.
3. Верещака Л. П., Галюн Н. С., Крайко А. Н., Стернин Л. Е. Результаты расчета методом характеристик течения газа с частицами в осесимметричных соплах и сравнение с результатами одномерного приближения. *Изв. АН СССР, МЖГ*, 1968, № 3.
4. Дритов Г. В., Тишин А. П. Расчет неравновесного течения газа с частицами конденсата в сопле Лавалья. *Изв. АН СССР, МЖГ*, 1969, № 5.
5. Дритов Г. В., Тишин А. П. О профилировании сопел, работающих на газе с частицами конденсата, *Изв. АН СССР, МЖГ*, 1971, № 1.
6. Камзолов В. Н., Маслов В. Н., Пирумов У. Г. Исследование траекторий частиц в соплах Лавалья. *Изв. АН СССР, МЖГ*, 1971, № 5.
7. Regan J. F., Thompson H. D., Hoglund R. F. Two-dimensional analysis of transonic gas-particle flow in axisymmetric nozzles. *AIAA Journal*, vol. 9, No. 4. (Рус. перев.: Исследование трансзвукового течения смеси газа и частиц в осесимметричных соплах. *Ракетная техника и космонавтика*, т. 9, № 4.)
8. Васенин И. М., Миллер В. Л. Двухфазное течение в осесимметричном сопле Лавалья. В сб. «Аэрогазодинамика», Новосибирск, «Наука», 1973.
9. Van de Hulst M. C. Light scattering by small particles. N. Y., Wiley; Chapman, 1957. (Рус. перев.: Рассеяние света малыми частицами. М., Изд-во иностр. лит., 1961.)
10. Кабанов М. В., Савельев Б. А., Фадеев В. Я. Зависимость границ применимости закона Бугера в рассеивающих средах от оптического диаметра светового пучка. *Изв. вузов, Физика*, 1967, № 7.
11. Горбис З. Р. Теплообмен и гидромеханика дисперсных сквозных потоков. М., «Энергия», 1970.