

4. Гришин С. Д., Тишин А. П., Хайрутдинов Р. И. Неравновесное двухфазное течение в сопле Лавала с коагулирующей частиц полидисперсного конденсата. Изв. АН СССР, МЖГ, 1969, № 2.
5. Hoffman J. D., Thompson H. D. A general method for determining optimum thrust nozzle contour for gas-particle flows. AIAA Paper No. 66-538, 1966. (Рус. перев.: Вопр. ракет. техн., 1967, № 3).
6. Hoffman J. D., Thompson H. D. Optimum thrust-nozzle contours for gas-particle flows. AIAA Journal, 1967, vol. 5, No. 10. (Рус. перев.: Ракетная техника и космонавтика, 1967, т. 5, № 10.)
7. Крайко А. Н., Осипов А. А. К решению вариационных задач сверхзвуковых течений газа с инородными частицами. ПММ, 1968, т. 32, вып. 4.
8. Дритов Г. В., Тишин А. П. Расчет неравновесного течения газа с частицами конденсата в сопле Лавала. Изв. АН СССР, МЖГ, 1969, № 5.
9. Гонор А. А., Крайко А. Н. Некоторые результаты исследования оптимальных форм при сверх- и гиперзвуковых скоростях. В кн.: «Теория оптимальных аэродинамических форм», М., «Мир», 1969.
10. Крайко А. Н., Мельников Д. А., Пирумов У. Г., Сергеенко А. А., Стернин Л. Е., Шмыглевский Ю. Д. Замечания к статье Л. В. Гогиша «Исследование коротких сверхзвуковых сопел» (Изв. АН СССР, МЖГ, 1966, № 2). Изв. АН СССР, МЖГ, 1967, № 1.
11. Алемасов В. Е., Дрегалин А. Ф., Тишин А. П. Теория ракетных двигателей. М., «Машиностроение», 1969.
12. 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.
13. Rao G. V. R. Approximation of optimum thrust nozzle contour. ARS Journal, 1960, vol. 30, No 6.
14. Baily W. S., Nilson E. N., Serra R. A., Zupnik T. F. Gas-particle flow in an axi-symmetric nozzle. ARS Journal, 1961, vol. 31, No 6.
15. Detonation and two-phase flow. New York — London, Acad. Press, 1962. (Рус. перев.: Детонация и двухфазное течение. М., «Мир», 1966.)
16. Wilde D. J. Optimum seeking methods. Prentice-Hall inc. Englewood Cliffs, N. Y., 1964. (Рус. перев.: Методы поиска экстремума. М., «Наука», 1967.)

РАСЧЕТ ДВУХФАЗНЫХ ПОТЕРЬ В СОПЛАХ ПРИ НАЛИЧИИ КОАГУЛЯЦИЙ И ДРОБЛЕНИЯ КАПЕЛЬ КОНДЕНСАТА

Г. Л. БАБУХА, Л. Е. СТЕРНИН, А. А. ШРАЙБЕР

(Киев, Москва)

Приводится метод и результаты расчета неравновесного течения двухфазной смеси газ — капли конденсата с учетом коагуляции и дробления частиц при соударениях.

Течение двухфазных смесей, состоящих из газа и полидисперсных капель жидкости, представляет интерес для многих областей техники. Соударения капель различной дисперсности в зависимости от ряда факторов могут приводить к объединению, либо к дроблению столкнувшихся частиц. Двухфазные потери удельного импульса, связанные с температурным и скоростным отставанием капель от газового потока, в первую очередь определяются преобладанием того или иного из этих явлений.

Известен ряд работ, посвященных анализу неравновесного течения смеси при условии полного объединения соударяющихся частиц (см. обзоры в [1, 2]). В наиболее общей постановке эта задача рассматривается в работе [2], однако здесь не учитывается возможность дробления капель при соударениях. Ниже приводятся результаты исследования этого вопроса с учетом объединения и дробления частиц.

Прежде всего было предпринято экспериментальное исследование взаимодействия неподвижной крупной капли (мишени) с потоком мелких (снарядов), движущихся с различными скоростями. В качестве генератора снарядов использовался вращающийся в горизонтальной плоскости капилляр, из конца которого по касательным к описываемой им окружности двигался поток монодисперсных капель. Получение капель одинакового размера обеспечивалось наложением колебаний звуковой частоты на конец капилляра. Диаметр и скорость снарядов регулировались количеством оборотов, длиной и диаметром капилляра и составляли $\delta_j = 100 \div 400 \text{ мкм}$, $u_j = 10 \div 30 \text{ м/сек}$.

На пути снарядов подвешивалась крупная капля диаметром $\delta_i = 1.5 \div 2.5$ мм. Опыты проводились на воде, спирте и водоглицериновых смесях и заключались в определении изменения массы мишени в зависимости от режима «обстрела». При этом измерялся некоторый суммарный, усредненный эффект взаимодействия каплей за достаточно большие промежутки времени (3–10 сек). За это время мишень претерпевала несколько десятков соударений при различных углах встречи капель. Усредненный эффект характеризовался параметром коагуляции и дробления Φ_{ji} , который представлял собой отношение изменения массы мишени к общей массе столкнувшихся с ней снарядов.

При обработке опытных данных использовались критерий Рейнольдса R , вычисленный при условии движения мелкой капли внутри крупной, и критерий устойчивости мишени Γ

$$R = \frac{u_j \delta_j \rho_b}{\eta}, \quad \Gamma = \frac{\eta^2}{\delta_i \sigma \rho_b}$$

Здесь ρ_b , σ , η — плотность, поверхностное натяжение и вязкость жидкости.

Опыты проводились в диапазоне $12 < R < 900$, $10^{-3} < \Gamma < 0.5$.

Экспериментальные данные описываются формулой

$$\Phi_{ji} = 0.67 - 0.019 R \Gamma^{0.4} \quad (1)$$

В проводившихся опытах особенности поведения соударяющихся капель фиксировались с помощью скоростной киносъемки. Это позволило установить, что процесс взаимодействия капель условно можно считать состоящим из двух этапов: полного объединения снаряда с мишенью и последующего вылета из нее либо одной капли, размером близким к размеру снаряда, с незначительной скоростью (преимущественно центральные удары), либо группы капель с такими же незначительными скоростями (удар, близкий к касательному). На этом основании была принята упрощенная модель процесса, в соответствии с которой диаметр образующихся осколков равен размеру мелких капель, а скорость их — скорости крупных. В рамках этой модели изменение параметров полидисперсного конденсата описывается уравнениями [3, 4]

$$\begin{aligned} \frac{d\delta_i}{dl} &= \frac{w\rho}{2u_i\delta_i^2} \sum_{j=1}^i E_{ji}\Phi_{ji}(\delta_i + \delta_j)^2 \mu_j \frac{|u_j - u_i|}{u_j} \\ \frac{d\mu_i}{dl} &= 3\mu_i \left[\frac{1}{\delta_i} \frac{d\delta_i}{dl} - \frac{w\rho}{2u_i} \sum_{j=i}^n E_{ij}\Phi_{ij}(\delta_i + \delta_j)^2 \mu_j \frac{|u_i - u_j|}{u_j \delta_j^3} \right] \\ \frac{du_i}{dl} &= A_i + \frac{3w\rho}{2u_i\delta_i^3} \sum_{j=1}^n B_{ji}E_{ji}(\delta_i + \delta_j)^2 \mu_j \frac{u_j - u_i}{u_j} |u_j - u_i| \\ \frac{dT_i}{dl} &= D_i + \frac{3w\rho}{2u_i\delta_i^3} \sum_{j=1}^n B_{ji}E_{ji}(\delta_i + \delta_j)^2 \mu_j \frac{|u_j - u_i|}{u_j} \left[(T_j - T_i) + \frac{(u_j - u_i)^2}{2c} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь μ , T — концентрация и температура конденсата, l — продольная координата, w — скорость газа, ρ — отношение плотностей газа и конденсата, E — коэффициент осаждения, c — теплоемкость конденсата, A — аэродинамическая сила, D — интенсивность межфазового теплообмена,

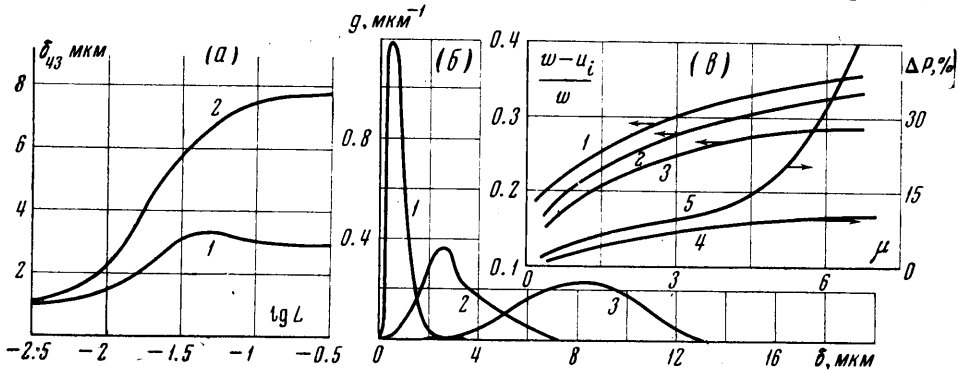
$$B_{ji} = 1 \quad \text{при } j \leq i, \quad B_{ji} = \delta_i^3 \delta_j^{-3} (1 - \Phi_{ij}) \quad \text{при } j > i.$$

Для упрощения конденсат предполагается состоящим из конечного числа n фракций, которые нумеруются в порядке возрастания размера частиц. Уравнения (2) легко обобщаются на случай непрерывной плотности распределения капель по размерам [3].

Для замыкания системы (2) используются уравнения неразрывности и состояния газа, а также уравнения баланса импульса и энергии для смеси [2].

Ниже приводятся некоторые результаты расчетов, выполненных по описанному методу применительно к течению в соплах продуктов сгорания типичных твердых топлив [6]. Расчеты проводились в широком диапазоне начальных давлений и концентраций конденсированной фазы. Варьировались также профиль сопла и гранулометрический состав исходного конденсата.

На фигуре, *a* показано изменение среднемассового диаметра частиц δ_{43} по относительной длине сопла L ($L = l/l^*$, l^* — общая длина сопла) при наличии (кривая 1) и при отсутствии (кривая 2) дробления капель для одного из типичных вариантов расчета ($\mu = 3$). В последнем случае процесс коагуляции конденсата происходит



очень быстро: в сечении $L \approx 0.02$ тонкие фракции практически отсутствуют, а при $L > 0.05$ конденсат почти полностью состоит из трех наиболее крупных фракций. В реальных условиях (т. е. с учетом дробления) процесс роста, естественно, протекает значительно медленнее. Характерно, что вначале (т. е. при $L < 0.05$) преобладает объединение капель при соударениях, а затем — их дробление, о чем свидетельствует некоторое снижение величины δ_{43} (фигура, *a*). Примерно таков же характер зависимости $\delta_{43}(L)$ и для других вариантов расчета. При прочих равных условиях средний размер капель на срезе сопла существенно увеличивается с ростом концентрации конденсата. Так, для одного из вариантов при $\mu = 0.33$ $\delta_{43} = 1.06$ мкм, а при $\mu = 6$ $\delta_{43} = 4.61$ мкм.

На фигуре, *b* приведена гранулометрическая характеристика конденсата (массовая плотность распределения капель по размерам) во входном сечении (кривая 1) и на срезе сопла при полном объединении капель (кривая 3) и при наличии их дробления (кривая 2) ($\mu = 3$). При других концентрациях конденсата характер кривой 2 примерно такой же. Если же расчет ведется без учета дробления частиц, то при высоких концентрациях конденсат на срезе сопла становится практически монодисперсным.

На фигуре, *c* показано относительное скольжение трех наиболее крупных фракций на срезе сопла при различных концентрациях (кривые 1—3). Здесь же приведены значения двухфазных потерь удельного импульса при полном объединении капель (кривая 5) и при наличии их дробления (кривая 4). Следует отметить, что значения ΔP , вычисленные без учета дробления частиц, по порядку величины совпадают с результатами, полученными в работе [2]. При прочих равных условиях потери импульса несколько увеличиваются с возрастанием начального давления и среднего размера частиц на входе в сопло. Для сравнения укажем, что при отсутствии взаимодействия капель величина ΔP не превышает 1%.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о необходимости учета дробления капель конденсата при их соударении, так как в противном случае средний размер капель и потери импульса оказываются завышенными в несколько раз.

Поступило 13 VII 1970

ЛИТЕРАТУРА

- Ильинский В. А. Статья редактора русского перевода в кн. «Гетерогенное горение». М., «Мир», 1967.
- Гришин С. Д., Тишин А. П., Хайрутдинов Р. И. Неравновесное двухфазное течение в сопле Лавала с коагуляцией частиц полидисперсного конденсата. Изв. АН СССР, МЖГ, 1969, № 2.
- Бабуха Г. Л., Шрайбер А. А. Аналитическое исследование процесса термической грануляции полидисперсного материала во взвешенном состоянии. В кн. «Процессы горения и термической обработки материалов», Киев, «Наукова думка», 1967.
- Шрайбер А. А. Об уравнениях коагуляции и дробления капель конденсата при течении двухфазных смесей в соплах. В кн. «IX Республиканская междузювская конференция по вопросам испарения, горения и газовой динамики дисперсных систем», Одесса, 1969.
- Сарнер С. Химия ракетных топлив. М., «Мир», 1969.