МЕХАНИКА
ЖИДКОСТИ И ГАЗА
№ 5 • 1993

УДК 533.6.011:541.182.3:519.63

© 1993 г. В. В. БООС, С. А. КАНТОР, М. П. СТРОНГИН

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ГАЗОДИСПЕРСНОГО ПОТОКА, НАТЕКАЮЩЕГО НА НЕПЛОСКУЮ ПРЕГРАДУ

Численно моделируется взаимодействие осесимметричной газодисперсной сверхзвуковой струи с преградой, имеющей цилиндрическую выемку, соосную с натекающей на преграду струей. Рассчитывается поведение твердых сферических частиц в струе. Анализируются условия наплавления частиц на преграду в зависимости от начальной скорости и местоположения частиц.

В работах, связанных с проблемой нанесения покрытий на изделия (см., например, [1—5]) область моделирования обычно имеет простую геометрическую форму — струя натекает на плоскую преграду или на торец цилиндра. В данной работе постановка задачи соответствует условиям эксперимента [6].

1. Расчетная область и схема течения изображены на фиг. 1: *1* — ствол установки, из которой истекает струя, *2* — преграда с выемкой, точками отмечены места ввода частиц в поток.

Предполагается, что в силу малости объемной концентрации частиц они не влияют на движение газа и не взаимодействуют между собой; при достижении преграды частицы отскакивают от нее, если их температура меньше температуры плавления материала частицы, и наплавляются на нее — в противном случае.

При сделанных предположениях поведение идеального газа может быть описано нестационарными уравнениями газовой динамики в цилиндрической системе координат [5]. Для замыкания системы уравнений используется уравнение состояния совершенного газа.

В момент времени $t=0$ в расчетной области газ неподвижен, параметры газа соответствуют нормальным условиям, т. е. давлению $P=1$ ат и температуре $T=300$ K.

Граничные условия имеют следующий вид. На твердых поверхностях нормальная составляющая вектора скорости равна нулю. На открытых границах — мягкие условия, т. е. производные параметров потока газа по направлению нормали к границе равны нулю. На оси симметрии — условия симметрии. На срезе ствола задаются давление, скорость и температура газа.

Задача решалась методом Годунова [5], имеющем первой порядок аппроксимации по всем переменным. Далее для стационарного случая полученное решение уточнялось методом Годунова — Колгана [7]. При решении задач установлением этот метод имеет второй порядок аппроксимации, менее размывает скачки уплотнения, контактные разрывы и ударные волны, хотя требует в 1,5 раза меньший шаг по времени.

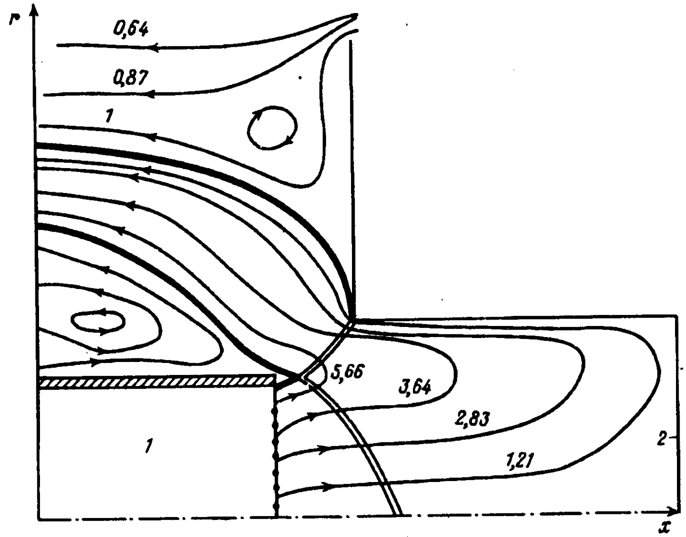
Решения стационарной задачи получались в процессе установления численного решения.

Для моделирования поведения частиц решалась следующая система уравнений, записанная в декартовой системе координат:

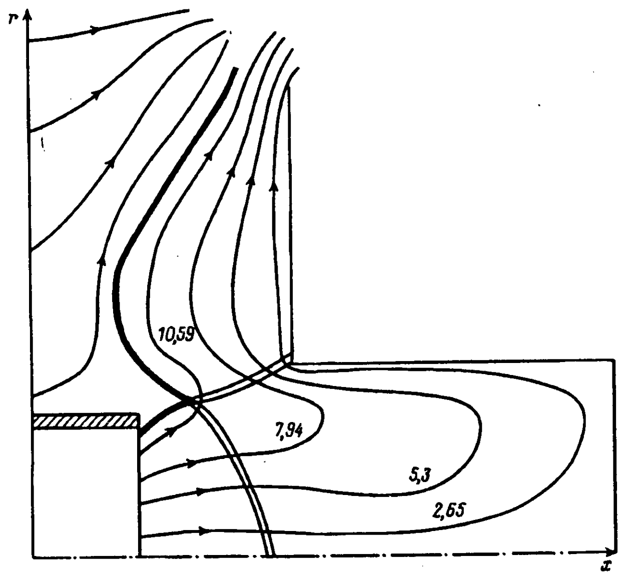
$$\frac{d\mathbf{X}_p}{dt}=\mathbf{U}_p,\quad \frac{d\mathbf{U}_p}{dt}=\frac{\mathbf{U}-\mathbf{U}_p}{\tau_g},\quad \frac{dH_p}{dt}=\frac{(S-S_p)}{\tau_t} \tag{1.1}$$

$$\tau_g=\frac{\rho_p d_p^2}{18\eta f_d},\quad \tau_t=\frac{\rho_p d_p^2}{6\mathrm{Nu}},\quad H_p=\int\limits_{T_0}^{T_p} C_s(T)\,dt$$

$$C_s=C_p+\sum_{\Phi}\delta(T_p-T_\Phi)\,h_\Phi,\quad S=\int\limits_{T_0}^{T}\lambda(T)\,dt$$



Фиг. 1



Фиг. 2

$$S_p = \int\limits_{T_0}^{T_p} \lambda(T)\,dt, \quad f_d = \frac{(1 + 0{,}15\,\mathrm{Re}^{0{,}687})}{(1 + 3{,}82\,\mathrm{M/Re})}$$

$$\mathrm{M} = \frac{|\mathbf{U} - \mathbf{U}_p|}{C}, \quad \mathrm{Nu} = 2 + 0{,}6\,\mathrm{Re}^{0{,}5}\,\mathrm{Pr}^{0{,}33}$$

$$\mathrm{Re} = \rho d_p \frac{|\mathbf{U} - \mathbf{U}_p|}{\eta}, \quad C = \left(\frac{\gamma p}{\rho}\right)^{1/2}$$

Здесь $\mathbf{X}_p$, $\mathbf{U}_p$, T_p, H_p, d_p — векторы координат и скорости, температура, энтальпия, диаметр частицы; τ_v, τ_t — коэффициенты динамической и тепловой релаксации частицы; ρ_p, C_p — плотность и удельная теплоемкость материала частицы; T_Φ, h_Φ — температура и удельная теплота фазового перехода; f_d — поправка на отклонение обтекания частицы от стоксовского; Nu, Re, M, Rr — числа Нуссельта, Рейнольдса, Маха и Прандтля; $\eta(T)$, $\lambda(T)$ — вязкость и теплопроводность газа. Термодинамические свойства газа рассчитывались по программе «Астра-3» [8].

При достижении температуры испарения материала частицы изменение ее диаметра описывается уравнением

$$\frac{dd_p}{dt} = \frac{(S_p - S)}{3\tau_t H_e} C_s d_p \tag{1.2}$$

где H_e — энтальпия испарения.

Начальные условия для системы уравнений (1.1), (1.2) определяют положение частицы X_0, Y_0, ее температуру T_0, скорость $U_0 = (v_0, 0)$ и энтальпия H_0 в момент времени $t = t_0$.

Для решения системы уравнений (1.1), (1.2) применяется метод Рунге — Кутта второго порядка точности.

2. Моделировалось течение газодисперсной среды в области, имеющей следующие геометрические размеры: диаметр ствола $D_s = 16$ мм, диаметр преграды $D_w = 64$ мм, глубина и диаметр выемки $H_v = 20$ мм, $D_v = 24$ мм. Расстояние от среза ствола до преграды X_n изменялось от 5 до 12 мм. Предполагалось, что газ образовался в результате сгорания ацетилена в кислороде ($\gamma = 1{,}153$).

При $X_n = 5$ мм и параметрах потока на срезе ствола $p_s = 1{,}5$ ат, $v_s = 500$ м/с, $T_s = 300$ K стационарное решение имеет колоколообразную структуру. На фиг. 1 показаны линии тока (размерность функции тока г/с), границы падающей и веерной струи (жирные кривые), ударная волна и скачок уплотнения (двойные кривые). В этом случае образовавшаяся веерная струя разворачивается в направлении, противоположном направлению натекающей струи.

При $X_n = 10$ мм, $p_s = 3{,}28$ ат, $v_s = 500$ м/с, $T_s = 300$ K стационарное решение имеет структуру типа «пузырь» (фиг. 2, обозначения те же, что и на фиг. 1).

При увеличении X_n до 12 мм и фиксированных параметрах потока на срезе ствола $p_s = 3{,}6$ ат, $v_s = 500$ м/с, $T_s = 300$ K диаметр падающей струи становится больше диаметра выемки и образующаяся веерная струя растекается по преграде.

Приведенные выше стационарные решения качественно согласуются с данными эксперимента [6].

Кроме стационарных течений в эксперименте [6] наблюдались колебания веерной струи. При $X_n = 9$ мм, $p_s = 3{,}28$ ат, $M_s = 1$, $T_s = 300$ K веерная струя колеблется между положением «колокол» и «пузырь» с частотой 400 Гц. Однако численное моделирование течения газа при указанных выше параметрах не привело к колебаниям веерной струи, в результате было получено стационарное течение типа «пузырь».

Можно предположить, что колебания веерной струи вынужденные и вызваны пульсациями параметров газа в истекающей из ствола струе. Для проверки этого предположения при моделировании входные параметры потока задавались изменяющимися во времени по синусоидальному закону с частотой 400 Гц. Амплитуда колебания давления составляла 1,78 ат (от 1,5 до 3,28 ат) при $T_s = 300$ K.

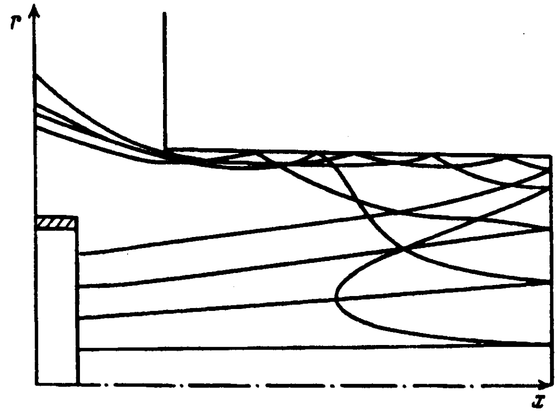
Установлено, что если колебания параметров газа на срезе ствола вносить в стационарную структуру течения типа «пузырь», то веерная струя будет лишь немного пульсировать возле стенки преграды, не отрываясь от нее.

Если вносить колебания параметров газа натекающей струи в стационарное поле типа «колокол», то в первой половине периода колебаний веерная струя перейдет из положения «колокол» в положение «пузырь», а далее будет пульсировать возле стенки.

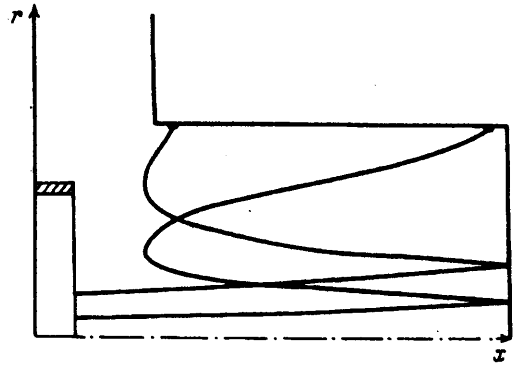
Если колебания истекающего из ствола газа моделировать с момента времени $t = 0$, то по истечении некоторого времени веерная струя опять-таки прижимается к стенке, совершая возле нее пульсации.

Такое несоответствие результатов численного моделирования пульсаций веерной струи данным эксперимента, вероятно, обусловлено преимущественно двумерным характером возбуждения неустойчивости в структуре «колокол» в отсутствие взаимодействия между веерной струей и преградой и трехмерным — в структуре «пузырь» при взаимодействии веерной струи с преградой. Естественно, что двумерная постановка не позволяет моделировать трехмерные эффекты.

Если диаметры ствола и выемки близки ($D_s = 20$ мм, $D_v = 24$ мм), а также диаметр натекающей струи близок к диаметру выемки (например, при $X_n = 7$ мм, $p_s = 1{,}4$ ат, $v_s = 500$ м/с, $T_s = 300$ K), в



Фиг. 3



Фиг. 4

выемке движение газа практически прекращается, давление увеличивается. При этом газ в выемке действует на натекающую струю как преграда.

3. Анализ поведения частиц проводился при следующих параметрах газового потока: $X_n = 5$ мм, $v_s = 500$ м/с, $T_s = 300$ К (см. фиг. 1). Отслеживались траектории частиц Al_2O_3 диаметром $d_p = 16$, 32, 64 мкм в зависимости от начальной скорости частиц и коэффициента упругости столкновения частиц с преградой k ($0 \leq k \leq 1$, т. е. при столкновении скорость частицы изменяется в k раз).

При увеличении начальной скорости частиц увеличивается число частиц, которые, ударяясь о дно выемки, вылетают из нее. Остальные частицы испытывают 2—4 столкновения с дном и стенками выемки, тем самым время пребывания таких частиц в выемке увеличивается. При уменьшении коэффициента k все частицы ударяются о дно и стенки выемки по 2—5 раз и выходят из выемки узким пучком (фиг. 3 : $d_p = 16$ мкм, $v_0 = 30$ м/с, $k = 0{,}5$). Это естественно, так как при столкновении с преградой частицы теряют часть скорости, а поэтому «следят» за потоком газа.

В потоке горячего газа при $T_s = 4000$ К изучались условия направления частиц на преграду. Коэффициент упругости столкновения частиц с преградой задавался в зависимости от температуры частицы

$$k = \begin{cases} 0{,}9, & 0 \leq T \leq 1900 \text{ K} \\ 0{,}9\,(1 - (T - 1900)/300), & 1900 \leq T \leq 2000 \text{ K} \\ 0, & T > 2200 \text{ K} \end{cases}$$

Частицы диаметром $d_p = 16$ мкм, долетая до преграды, успевают прогреться до температуры $T = 2300$ К и наплавляются на нее, равномерно покрывая дно и стенки выемки.

Частицы диаметром $d_p = 32$ мкм не успевают достаточно прогреться до первого столкновения с преградой и большая их часть вылетает из выемки. Наплавляются лишь частицы, введенные близко к оси или стенке ствола, в этом случае частицы сталкиваются с преградой по несколько раз и успевают нагреться до температуры плавления. Траектории частиц на фиг. 4 соответствуют случаю, когда частицы наплавляются только на стенки выемки ($d_p = 32$ мкм, $v_0 = 60$ м/с).

Частицы диаметром $d_p = 64$ мкм прогреваются медленнее и наплавляются только те из них, которые, испытав много соударений с дном и стенками выемки, могут при этом достаточно нагреться.

Во всех случаях скорость столкновения частиц с преградой при наплавлении находится в пределах 5—65 м/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Стронгин М. П.* Математическое моделирование потоков в высокотемпературных технологиях. Новосибирск: Изд-во НГУ, 1989. 219 с.
2. *Кантор Л. А., Кантор С. А., Стронгин М. П.* Расчет сверхзвукового гетерогенного потока при натекании на преграду//Изв. АН СССР. МЖГ. 1987. № 4. С. 182—185.
3. *Кантор Л. А., Кантор С. А., Стронгин М. П.* Расчет процесса детонационно-газового нанесения защитных покрытий//Физика горения и взрыва. 1987. № 4. С. 131—135.
4. *Штерн П. Г., Руденчик Е. А., Керимов А. К.* Осесимметричное потенциальное течение, возникающее при прямом ударе струи о плоскую стенку//Докл. АН СССР. 1991. Т. 317. № 5. С. 1085—1088.
5. *Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я. и др.* Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.
6. *Демин В. С., Кожин А. В.* Некоторые типы пульсаций при натекании сверхзвуковой струи на преграду с выемкой//Моделирование в механике. Разностные схемы. Новосибирск, 1989. Т. 3. № 5. С. 30—34.
7. *Тилляева Н. И.* Обобщение модифицированной схемы С. К. Годунова на произвольные нерегулярные сетки//Уч. зап. ЦАГИ, 1986. Т. 17. № 2. С. 18—26.
8. *Трусов Б. Г., Бадрак С. А., Туров В. П., Барышевская И. М.* Автоматизированная система термодинамических данных и расчетов равновесных состояний. Математические методы химической термодинамики. Новосибирск: Наука, 1982. С. 213—219.

Барнаул

Поступила в редакцию
23.IV.1992