

УДК 533.72:539.188

РЕЛАКСАЦИЯ АТОМАРНОГО ПУЧКА МАЛОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ В ПОКОЯЩЕМСЯ ГАЗЕ

А. А. Морозов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск

На основе численного моделирования методом пробных частиц исследована релаксация атомарного пучка малой интенсивности в покоящемся газе. Рассмотрены особенности температурного поля в области смешения. Получена зависимость размера области релаксации от начальной скорости и массы инжектируемых частиц. Определены условия, при которых размер области релаксации минимален.

Численное исследование релаксации стационарного молекулярного пучка в покоящемся газе заключается в расчете и анализе полей параметров инжектируемых молекул, формирующихся в результате релаксации от максимальной неравновесности в точке инъекции к диффузионному дрейфу при температуре фонового газа. Многочисленные прикладные аспекты этой задачи связаны с различными стадиями релаксации. Релаксация пучка определяет процессы перезарядки, возможности вывода электронных и ионных пучков, их очистки от нейтральных частиц, а также способы создания газоструйных заградительных мишеней [1]. Процессы, сопровождающие газодинамическое разделение при инъекции смеси газов и изотопов, происходят на стадии существенной релаксации инжектируемого потока частиц [2, 3]. В задачах смешения газов, связанных с вакуумными технологиями, представляет интерес характеристика полной релаксации инжектируемого газа в фоновом. К этому классу задач можно также отнести смешение молекулярного и сплошного потоков при взаимодействии факела ракетного двигателя с окружающей атмосферой на большой высоте [4], активное зондирование атмосферы молекулярным газом и электронными пучками, получение электронно-пучковой плазмы, распыление поверхности мишени высокоэнергетическими пучками.

Задача о релаксации молекулярного пучка неоднократно решалась в простейшей постановке: рассматривался однонаправленный односкоростной пучок малой интенсивности, при этом столкновения инжектируемых частиц между собой и их влияние на фоновый газ не учитывались. Задача в такой постановке решалась как аналитически [5–8], так и численно [9–12].

В большинстве работ исследуются интегральные характеристики процесса релаксации: глубина проникновения тяжелых частиц в фоновый газ [8, 9], характерное время и размер области релаксации [5, 10, 11], изменение моментов функции распределения инжектируемых частиц в процессе релаксации [7]. Изучается пространственное распределение газодинамических параметров инжектируемого газа [6, 11]. Исследуется формирование высокотемпературных зон в области релаксации при инъекции легких частиц с большой скоростью [12]. Несмотря на значительный интерес к процессу релаксации молекулярного пучка, по полученным результатам нельзя составить завершенное описание этого явления.

Работа выполнена при финансовой поддержке Президиума РАН (6-й Конкурс-экспертиза 1999 г. научных проектов молодых ученых РАН; грант № 57).

Данная работа посвящена численному исследованию релаксации пучка одноатомных частиц в указанной постановке и является продолжением [11]. Рассматриваются особенности пространственного распределения температуры в зоне релаксации, причем анализируются распределения энергии поступательного движения по различным направлениям в области с существенно неравновесным состоянием газа. Особое внимание уделяется оценке размера области релаксации в зависимости от массы и скорости инжектируемых частиц при использовании различных критериев в широком диапазоне этих величин.

1. Постановка задачи и основные определения. Рассматривается рассеивание однонаправленного атомарного пучка малой интенсивности на фоновом равновесном газе, состоящем из одноатомных частиц. Частицы пучка инжектируются из точечного источника. Начальная скорость для всех атомов пучка одинаковая. Столкновения инжектируемых частиц между собой и их воздействие на частицы фонового газа не учитываются. Задача решается методом пробных частиц [13].

Пространственное движение частиц рассматривается в цилиндрической области, на границе которой происходит полное поглощение инжектируемых частиц. Направление оси цилиндра совпадает с направлением инъекции. Размеры области выбирались таким образом, чтобы не было существенного влияния границ на область релаксации инжектируемых частиц. С учетом геометрии задачи введены цилиндрические координаты: r — расстояние до оси, ε — азимутальный угол; ось x совпадает с направлением инъекции, а начало системы координат — с положением источника.

Для описания взаимодействия атомов используется модель твердых сфер [14]. В качестве масштаба длины выбрана средняя длина свободного пробега частицы фонового газа $\lambda_0 = 1/(n_0\sigma\sqrt{2})$ (n_0 — числовая плотность; σ — сечение столкновения частиц), в качестве масштабов скорости и времени — наиболее вероятная тепловая скорость частиц фонового газа $c_0 = (2kT_0/m_0)^{1/2}$ (k — постоянная Больцмана; T_0 — температура фонового газа; m_0 — масса частицы фонового газа) и время $t_0 = \lambda_0/c_0$. По накопленной информации о состоянии инжектируемых частиц в элементах цилиндрического объема определялись плотность, скорость, энергия и поступательная температура T . Вычислялись также компоненты температуры T_{\parallel} и T_{\perp} , параллельная и перпендикулярная вектору скорости соответственно, что позволило провести анализ степени неравновесности по направлениям в области релаксации. Для вычисления T_{\parallel} и T_{\perp} в каждой ячейке вводилась локальная система координат (x', r') , связанная со скоростью газа в ячейке: направление оси x' совпадает с направлением вектора скорости, ось r' лежит в плоскости xr и перпендикулярна x' . Компоненты температуры определяются по формулам $T_{\parallel} = m(\langle u_{x'}^2 \rangle - \langle u_{x'} \rangle^2)/k$, $T_{\perp} = m\langle u_{r'}^2 \rangle/k$ [14], где m — масса частиц инжектируемого газа; $u_{x'}$, $u_{r'}$ — проекции скоростей частиц на оси x' и r' соответственно.

Численные эксперименты проводились в широком диапазоне масс инжектируемых легких ($M = m/m_0 < 1$) и тяжелых ($M > 1$) частиц. Скорость пучка изменялась от нуля до значений, превышающих среднюю тепловую скорость фонового газа на два порядка. Параметрами задачи являлись отношения масс M и скоростей $S = u_0/c_0$ (u_0 — начальная скорость инжектируемого газа).

Для описания релаксационной зоны вычислялись интегральные характеристики процесса, однозначно определяемые параметрами S и M . Для определения интегральных характеристик удобно рассмотреть временную эволюцию отдельных частиц. Для этого промежуток времени, в течение которого частица находится в анализируемом объеме пространства, разбивается на интервалы длиной Δt . При моделировании движения частицы в моменты времени $t_1 = \Delta t$, $t_2 = 2\Delta t$, ..., $t_j = j\Delta t$, ... определяются осевая компонента скорости частицы u_j , осевая координата частицы x_j и расстояние до точки инъекции $d_j = (x_j^2 + r_j^2)^{1/2}$ (r_j — радиальная координата). При осреднении значений по ансамблю

всех инжектируемых пробных частиц вычисляются глубина проникновения инжектируемых частиц в фоновый газ $X_j = \langle x_j \rangle$, расстояние от точки инъекции $D_j = \langle d_j \rangle$, компонента энергии $(E_x)_j = 0,5m\langle u_j^2 \rangle$ и функция распределения осевой компоненты скорости $f_j(u)$. В результате для достаточно малого значения Δt (в расчете $\Delta t = 0,1t_0$) можно построить временные зависимости указанных величин $X(t)$, $D(t)$, $E_x(t)$, $f(u, t)$.

При любом отношении масс M на бесконечном расстоянии от источника среднемассовое движение частиц имеет строго радиальный характер, такой же как при движении от некоторого фиктивного источника с центром на оси цилиндрической области, не совпадающим с положением точки инъекции. Расстояние от фиктивного источника до точки инъекции L_s может использоваться для оценки размера области релаксации [11]. Для вычисления L_s используется понятие глубины проникновения инжектируемых частиц в фоновый газ $X(t)$. С ростом t $X(t)$ стремится к предельному значению $X(\infty)$, которое совпадает с расстоянием от точки инъекции до фиктивного источника.

Для оценки расстояния, на котором инжектируемая частица “забывает” направление первоначального движения, используется понятие размера области релаксации импульса L_i [10, 11]. Для каждой частицы вычислялось значение осевой координаты x_i , при котором осевая компонента скорости частицы меняет знак в первый раз после момента инъекции (т. е. частица начинает двигаться в направлении, противоположном направлению инъекции). Размер области релаксации импульса вычислялся как среднее значение этой координаты, определенное по всем пробным частицам: $L_i = \langle x_i \rangle$.

Степень неравновесности состояния инжектируемого газа наиболее точно определяется из сравнения функции распределения скоростей, полученной в расчете, с равновесной функцией распределения, соответствующей температуре фонового газа. Для определения размера области неравновесности введено понятие размера области релаксации функции распределения. В определенные моменты времени (начиная с момента инъекции частицы) вычисляется площадь области, заключенной между равновесной и неравновесной функциями распределения:

$$\Delta f(t) = \int \max\{0, f_M(u) - f(u, t)\} du.$$

Здесь $f_M(u) = (c_0\pi^{1/2})^{-1} \exp(-(u/c_0)^2)$ — максвелловская функция распределения компоненты тепловой скорости при температуре фонового газа; $f(u, t)$ — функция распределения осевой компоненты скорости инжектируемых частиц, полученная в расчете. Время релаксации функции распределения определялось как интервал от момента инъекции до момента t_f , когда площадь Δf становится меньше 1 % площади под функцией распределения, т. е. $\Delta f(t_f) = 0,01 \int f_M(u) du$, а размер области релаксации функции распределения L_f определялся как среднее расстояние от точки инъекции $D(t_f)$, соответствующее этому моменту времени. Численные расчеты показали, что для осевой компоненты скорости требуется больше времени для релаксации, чем для радиальной компоненты, поэтому размер области релаксации L_f определялся по осевой компоненте скорости.

Кроме того, размер неравновесной области оценивался на основе сравнения компонент энергии инжектируемых и фоновых частиц. Для этого в определенные моменты времени находилась разность между компонентой средней энергии $E_x(t)$ и соответствующей компонентой энергии фоновых частиц $E_{x0} = 0,25m_0c_0^2$. Время релаксации энергии определялось как интервал от момента инъекции до момента t_E , когда E_x отличается от E_{x0} не более чем на 1 %, а размер области релаксации энергии L_E определялся как расстояние $D(t_E)$. Следует отметить, что полная энергия не может использоваться для вычисления размера области релаксации, поскольку при инъекции тяжелых частиц при определенных скоро-